

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

A aplicação do conhecimento científico na engenharia mecânica 3

Atena Editora
Ano 2023



Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

A aplicação do conhecimento científico na engenharia mecânica 3

Atena
Editora
Ano 2023

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Bruno Oliveira
Camila Alves de Cremo
Luiza Alves Batista
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

A aplicação do conhecimento científico na engenharia mecânica 3

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A642 A aplicação do conhecimento científico na engenharia mecânica 3 / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-0782-9
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.829230501

1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Título.

CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

APRESENTAÇÃO

A Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral.

Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas, reduzindo o tempo de execução e a utilização de materiais.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica e materiais, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas técnicas e econômicas.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais.

Aos autores, agradeço pela confiança e espirito de parceria.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

METROLOGIA PARA ENGENHARIAS: CONSTRUÇÃO DE UM PROJETO METROLÓGICO PARA APLICAÇÃO DE CONCEITOS

Data de aceite: 02/01/2023

Lisiane Trevisan
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS – Campus Farroupilha
Farroupilha – Rio Grande do Sul

Daniel Antonio Kapper Fabricio
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – IFSC – Campus Chapecó
Chapecó – Santa Catarina

RESUMO: A limitação de recursos para a construção de bancada didáticas no ensino superior gera a necessidade da criação de novas metodologias para disciplinas até então teóricas. Nesta ótica, este trabalho tem como objetivo a criação de uma metodologia de ensino para a disciplina de metrologia para o curso superior em engenharia mecânica. Para isso, este trabalho pretende mostrar uma prática aplicada dentro da disciplina de Metrologia, cujo nome é Projeto Metrológico. Este projeto proporciona a aplicação dos conceitos com base em medições realizadas pelos próprios alunos. As medições foram realizadas com base na escolha de um componente metálico que já tenha sido submetido a esforços mecânicos (rolamentos automotivos). As medições devem ser realizadas com a variação de diferentes parâmetros: instrumento de medição, técnicos e amostras. Com base nos resultados, os discentes foram orientados a determinar os erros de medição e o valor da incerteza de medição. Suas conclusões devem estar voltadas a comparação dos valores de incerteza de medição e os valores verdadeiros convencionais e tolerância determinados inicialmente. Observou-se que melhorias devam ser realizadas para a aplicação desta metodologia nos próximos semestres, como o reforço na demonstração dos cálculos de incerteza de medição.

PALAVRAS-CHAVE: Metrologia. Educação para engenharia. Engenharia mecânica.

METROLOGY FOR ENGINEERING: THEORETICAL CONCEPTS AND INDUSTRIAL PRACTICE

ABSTRACT: The limitation of resources for the construction of didactic benches in higher education generates the need to create new methodologies for previously theoretical disciplines. In this light, this work aims to create a teaching methodology for the discipline of Metrology in a higher course

of mechanical engineering. For this, this work intends to show an applied practice, named Metrological Project, within the discipline of Metrology. This project provides the application of concepts based on measurements made by the students themselves. The measurements were made based on the choice of a metallic component that had already been subjected to mechanical stresses (automotive bearings). Measurements were performed by varying different parameters: measuring instrument, technicians and samples. Based on the results, students were oriented to perform the determination of measurement errors and measurement uncertainty. Their conclusions aimed at the comparison of the measurement uncertainty values and the conventional true values and tolerance initially determined. It was observed that improvements should be made for the application of this methodology in the next semesters, such as the reinforcement in the demonstration of the measurement uncertainty calculations.
KEYWORDS: Measurement. Education in engineering. Mechanical engineering.

1 I INTRODUÇÃO

Metrologia é a ciência que trata das medições como um todo, abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições (INMETRO, 2012). A metrologia está presente em diferentes áreas da ciência, desde a medição de massa quando compramos maçãs na feira, quando abastecemos carro com combustível até grandes valores como a construção de um mapa geológico (FARUOLO, 2005).

A educação é uma ciência em constante transformação, e na contemporaneidade ela passa por novos desafios. Em 2003, Libâneo já sugeria algumas atitudes docentes necessárias diante da realidade do mundo contemporâneo, entre as quais pode-se mencionar a aprendizagem ativa e ensino como mediação e saber utilizar as novas tecnologias (LIBÂNEO, 2003).

Segundo Moran (2015), as escolas estão mudando para modelos mais centrados em aprender ativamente com problemas reais, desafios relevantes, jogos, atividades e leituras, valores fundamentais, combinando tempos individuais e tempos coletivos; projetos pessoais de vida e de aprendizagem e projetos em grupo. A tendência é priorizar o envolvimento maior do aluno, com metodologias ativas como o ensino por projetos de forma mais interdisciplinar, o ensino híbrido e a sala de aula invertida.

Atualmente, na educação, a tendência é priorizar o envolvimento maior do aluno, com metodologias ativas de aprendizagem e o ensino híbrido, contemplando os avanços tecnológicos recentes, de forma especial as tecnologias de informação e comunicação (LEITE, 2014).

Um dos desafios da atualidade é ensinar conceitos teóricos de uma forma diferente da metodologia tradicional de ensino, ou seja, ensinar através do uso de conceitos dentro de aplicações práticas. Mas, como criar uma metodologia de forma eficiente?

Podem ser utilizadas plataformas digitais para isso, mas esse trabalho busca um objetivo maior: fixação e aplicação dos conceitos de metrologia dentro das áreas de

qualidade e controle de qualidade, aliada à melhoria de resultados com o uso de conceitos da estatística dentro de projetos práticos de aplicação industrial.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma prática didática criada para a aplicação dos conceitos teóricos de metrologia (tais como sistema de medição, calibração, determinação de erros e calibração) dentro de um exercício prático nas aulas de metrologia do curso de engenharia mecânica do campus Farroupilha do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS).

2 I METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho foram determinadas algumas regras iniciais para que o processo de medição fosse transcorrido de uma forma uniforme, assim todos os alunos possuíam as mesmas ferramentas para o desenvolvimento do trabalho.

Inicialmente, na primeira aula do semestre, ocorre a escolha do componente que será usado para a prática educacional. Várias turmas escolheram diferentes materiais, desde estudo metrológico de lápis de cor, pistão automotivo e dobradiça de porta. A escolha está focada na disponibilidade destes componentes para que o grupo possa adquirir/buscar estes componentes a baixo custo.

Para o desenvolvimento do projeto, foi determinado inicialmente que os grupos deveriam ser formados com 2 alunos e 3 peças com mesmas características mecânicas. Grupos com grande número de alunos prejudica a distribuição de tarefas, sendo apenas um aluno sobrecarregado (em grande maioria dos casos) e um grande número de peças também onera um tempo muito grande para a realização das medidas que precisam serem feitas.

A escolha de três peças de um mesmo tipo justifica-se para possibilitar a comparação entre os indivíduos e os instrumentos, além da comparação entre as medidas obtidas pelas diferentes amostras entre si. Esta comparação é fundamental para a aplicação de conceitos como erros de medição e a estimativa da incerteza de medição.

Então, a sequência da metodologia aplicada a este projeto está resumida nas seguintes etapas:

- Apresentação dos conceitos teóricos em conjunto com o andamento do projeto metrológico;
- Definição dos parâmetros do projeto metrológico – com escolha do componente que será usado no projeto;
- Escolha do instrumento de medição mais adequado – escolha realizada pelo grupo de alunos;
- Calibração dos instrumentos de medição que serão usados no projeto metrológico;

- Realização das medidas dos componentes metálicos escolhidos;
- Cálculo estatístico: média, desvio-padrão e construção de histograma dos valores medidos;
- Estimativa de fontes de erro e cálculo da incerteza de medição conforme orientações do professor;
- Elaboração do relatório final – ao longo do semestre e entrega do relatório final;
- Apresentação oral do projeto final para a turma;

O projeto foi avaliado com base em duas avaliações: relatório escrito e apresentação oral pelo grupo de alunos para a turma do semestre. O relatório escrito foi construído com o auxílio do docente ao longo das aulas do semestre e assim, o desenvolvimento do trabalho foi realizado acompanhando ao longo das etapas. A apresentação oral auxilia no desenvolvimento da capacidade de síntese de um projeto, assim os alunos precisam treinar a síntese de um projeto desenvolvido ao longo de meses a ser realizado no tempo estipulado de 15 minutos.

3 I RESULTADOS

O componente escolhido para a apresentação dos resultados está focado no estudo dimensional de um componente automotivo (rolamento), conforme descrito na Figura 1.

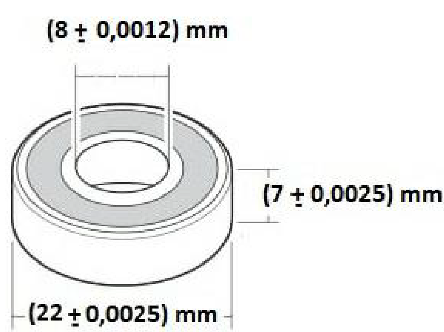


Figura 1 - Demonstração do rolamento automotivo escolhido pelos grupos da turma 2019 – primeiro semestre. Desenho inclui cotas e tolerâncias. Medidas em milímetros.

Conforme demonstrado na Figura 1, o componente metálico escolhido possui um número grande de características de qualidade as quais precisam ser monitoradas dentro do processo produtivo para que o mesmo obtenha garantia deste produto.

Neste projeto metrológico, o docente permite que cada grupo determine, conforme sua experiência e vivência industrial, que sejam estabelecidas as variáveis (características da qualidade) as quais o grupo considere como importante. Os valores de referência (valor

verdadeiro convencional) e sua tolerância também serão descritos pelos alunos.

Para o projeto metrológico do primeiro semestre de 2019, os parâmetros e seus valores estão descritos na Tabela 1 conforme a descrição individual de cada grupo.

Grupo	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3
A	Espessura 7,000 ± 0,0025 mm	Diâmetro Interno 8 ± 0,0012 mm	Diâmetro Externo 22 ± 0,0025 mm
B	Altura 16 mm ± 15μm	Diâmetro Interno 30 mm -13μm	Diâmetro Externo 62 mm + 13μm
C	Altura 23,40 mm	Diâmetro Interno 40 mm	Diâmetro Externo 90,8 mm
D	Altura 23,80 ±0,05 mm	Diâmetro Interno 30,00 ± 0,05 mm	Diâmetro Externo 62,00 ± 0,05 mm

Tabela 1 - Parâmetros escolhidos pelos alunos para o desenvolvimento do projeto metrológico.

Conforme mostrado na Tabela 1, os rolamentos usados por cada grupo foram diferentes entre si, ou seja, rolamento com diferentes usos. A única exigência é que os componentes que o grupo irá trabalhar devam ter mesmas especificações, além disso, os mesmos deveriam ser usados ou terem sido submetidos a esforços mecânicos.

A Tabela 1 mostra que as cotas escolhidas para a realização do estudo metrológico foram praticamente as mesmas, espessura/altura, diâmetro interno e diâmetro externo.

Observa-se que o grupo C não estipulou qualquer tolerância do produto pronto, o que é um problema e o mesmo foi verificado apenas na entrega dos relatórios escritos, devido ao atraso das atividades. Nota-se também que não há uma uniformidade do número de casas decimais, com exceção do grupo D, sendo que algumas nem apareceram no valor nominal caso B e C, o que mostra o desconhecimento do conhecimento relacionado a algarismos significativos, conteúdo abordado no início do curso de graduação, mas há dificuldades na aplicação dos conceitos. Além disso, o grupo B misturou medidas em milímetros e micrômetros, o que também é um erro do ponto de vista da Metrologia.

A partir das cotas declaradas com suas respectivas tolerâncias, os grupos iniciaram a realização das medidas. Como o objetivo desta disciplina é a interpretação das medidas e o que fazer com as mesmas, lidar com esse desafio faz parte das atividades de um engenheiro mecânico. Fica bem claro deste o início da disciplina que poucos engenheiros têm pela frente o desafio de realizar medidas ao longo de sua jornada profissional, grande maioria trabalha com valores medidos por outros técnicos ou departamentos dentro da empresa e, a partir dos valores medidos, precisam tomar medidas com esses valores.

A segunda etapa do projeto foi a escolha do instrumento de medição mais adequado, escolhido pelo grupo. Nesta etapa, a resolução do equipamento e suas características devem ser avaliadas pelo grupo e o docente permite que cada grupo realize a sua escolha e justifique sua escolha no relatório escrito. Ressalta-se que mesmo que os conceitos

teóricos tenham sido previamente apresentados, os grupos em grande parte acabam realizando uma escolha que não abrange as tolerâncias apresentadas inicialmente.

3.1 Calibração

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), calibração pode ser definida como:

> "Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação" (INMETRO, 2012, p. 27).

Dentro do procedimento de calibração são tratados outros conceitos como rastreabilidade e sistema de medição. Estes conceitos muitas vezes não são compreendidos em sua integralidade.

Como os instrumentos de medição existentes no campus Farroupilha do Instituto Federal do Rio Grande do Sul não estão calibrados, e além disso, mostra-se a necessidade da realização da calibração dentro do projeto metrológico.

A etapa subsequente à escolha do instrumento é a realização da calibração do mesmo com o sistema metrológico e recursos internos ao sistema. O processo de calibração deverá ser feito com a comparação dos valores medidos no instrumento de medição com os valores indicados por um conjunto de blocos-padrão. Os valores de erro de medição calculados para os instrumentos de medição usados por cada grupo estão especificados pela Tabela 2.

Grupo	Calibração – Instrumento de Medição 1	Calibração – Instrumento de Medição 2
A	A calibração foi realizada para apenas um bloco-padrão. Erro de +0,015 mm Erro zero = zero	A calibração foi realizada para apenas um bloco-padrão. Erro de +0,015 mm Erro zero = zero
B	A etapa de calibração foi realizada, porém o valor do erro foi determinado como zero.	A etapa de calibração foi realizada, porém o valor do erro foi determinado como zero.
C	Não realizou a etapa de Calibração dos instrumentos de medição.	Não realizou a etapa de Calibração dos instrumentos de medição.
D	Realizou a calibração do instrumento para 3 blocos-padrão com os valores de erro: 20 mm = 0,00 mm 30 mm = 0,00 mm 60 mm = -0,05 mm	Realizou a calibração do instrumento para 3 blocos-padrão com os valores de erro: 20 mm = +0,05 mm 30 mm = 0,00 mm 60 mm = +0,05 mm

Tabela 2 – Calibração para cada um dos dois instrumentos usados.

Na Tabela 2, o erro do instrumento indica a diferença entre o valor medido e o valor de referência do bloco padrão. É possível observar que mesmo que a aula teórica

tenha sido a mesma para a turma de alunos, cada grupo procedeu da forma que achou mais adequado. Se for comparado entre os 4 grupos, cada um deles procedeu de forma independente e diferente entre si.

Ainda assim, para compor o erro relacionado à calibração do instrumento, fonte de incerteza para o cálculo do valor da incerteza de medição, esta fonte de incerteza foi considerada como sendo o erro relacionada à calibração mais o erro do zero (valor marcado quando o instrumento é posicionado no valor zero, início da escala). O que foi executado apenas pelo grupo A.

3.2 Realização das medições

Após a realização da calibração dos instrumentos de medição, os rolamentos passaram por limpeza. Depois de limpos, foram realizadas as medidas das características da qualidade conforme descrito na Tabela 1.

A orientação inicial era que para cada característica da qualidade escolhida, o grupo deveria realizar as medidas para cada um dos alunos e para cada um dos dois instrumentos de medição, repetindo as medidas de cada condição 5 vezes. Assim, os grupos deveriam realizar as medidas da seguinte forma:

- Aluno 1 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 1;
- Aluno 1 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 2;
- Aluno 1 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 3;
- Aluno 1 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 1;
- Aluno 1 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 2;
- Aluno 1 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 3;
- Aluno 2 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 1;
- Aluno 2 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 2;
- Aluno 2 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 3;
- Aluno 2 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 1;
- Aluno 2 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 2;
- Aluno 2 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 3;

Devido à extensão de dados gerados com esta combinação de parâmetros, os valores não serão apresentados neste trabalho. Mas ressalta-se que o objetivo principal na geração destes dados foi a comparação entre os valores medidos para diferentes alunos, instrumentos de medição e controle de qualidade. Nem todos os grupos mostraram interesse na realização de todas as combinações, tampouco na interpretação dos dados gerados nestas medições.

3.3 Incerteza de Medição

O processo de calibração realizado nos instrumentos de medição garante os valores de incerteza de medição calculados para as medidas realizadas nos componentes. Assim a calibração com rastreabilidade indicada reduz os erros e aumenta a confiabilidade dos valores medidos (FERNANDEZ, 2009).

Após realizar as medidas, os grupos foram orientados a estimar a incerteza de medição, que pode ser definida como um "parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas" (INMETRO, 2012, p. 24).

O método de cálculo apresentado aos alunos deveria considerar apenas duas fontes de incerteza de medição: fonte relacionada a calibração dos instrumentos usados e a fonte relacionada ao desvio padrão das medições realizadas. Limitar o número de fontes de incerteza tem o objetivo de simplificar a realização dos cálculos. A Tabela 3 apresenta os valores de incerteza de medição.

Grupo Parâmetro	**A**	**B**	**C**	**D**
Espessura/ Altura	7,02 ± 0,056 mm	16,02 ± 0,07 mm	Não foi determinado	23,78 ± 0,09 mm
Diâmetro Interno	8,00 ± 0,056 mm	29,98 ± 0,07 mm	Não foi determinado	30,00 ± 0,09 mm
Diâmetro Externo	22,01 ± 0,056 mm	62,04 ± 0,07 mm	90,75 ± 0,0108 mm	62,00 ± 0,09 mm

Tabela 3 – Valores de incerteza de medição calculados para cada grupo.

Ressalta-se que mesmo demonstrando o método de cálculo para o valor de incerteza de medição, os valores são significativamente diferentes entre si, quando observado a ordem de grandeza. Todos os grupos analisados utilizaram mesmo tipo de instrumento de medição e com mesma resolução, o que demonstra mais uma vez falta de conhecimento para algarismos significativos. Por exemplo, um instrumento de medição com resolução para dois algarismos não pode fornecer incerteza de medição para quatro algarismos significativos.

O grupo C não realizou o estudo metrológico para as cotas espessura/altura e diâmetro interno alegando falta de tempo para o desenvolvimento do projeto, o que não ocorreu com os demais grupos (A, B e D). Isso leva a crer que o grupo não soube distribuir as atividades ao longo do semestre letivo.

Observa-se, na Tabela 3, que alguns dos valores médios foram expressos como inteiros, o que indica que os alunos podem ter (erroneamente) arredondado alguns dos valores médios. Foi ressaltado que o importante não apresentar os valores medidos que

sejam exatos aos valores teóricos (VVC).

Durante a apresentação final do projeto metrológico, foram argumentadas as diferenças e semelhanças entre os valores teóricos e os valores obtidos nas médias dos valores medidos. Muitos grupos não souberam explicar as diferenças, e os argumentos para explicação foram vários como: “a diferença deve estar focada no instrumento de medição que é diferente ao instrumento de medição que o fabricante de rolamentos usa”, outro grupo comentou que “não sabíamos usar o instrumento de medição e isso pode ter causado erros de medida”, e até outros comentários mais coerentes com a realidade “por se tratar de um rolamento usado, por isso encontramos incerteza de medição tão baixa”.

Comparando os valores de incerteza de medição com os valores descritos inicialmente como VVC (Valor Verdadeiro Convencional) e sua tolerância, a finalização do projeto metrológico precisa responder ao seguinte questionamento: os valores estabelecidos inicialmente para cada cota foram determinados na prática?

Assim, os valores determinados na Tabela 1 e a Tabela 3 foram então apresentados pelos alunos e assim eles deveriam classificar entre “APROVADO”, onde os valores experimentais encontram-se dentro do intervalo teórico; e “NÃO APROVADO’, para quando não abrangem os critérios “APROVADO”.

Para todos os critérios de controle de qualidade para todos os grupos, os valores obtidos experimentalmente não foram aprovados. Todos os grupos usaram do mesmo argumento para justificar a não aprovação: o valor da incerteza de medição é maior que o valor da tolerância estipulada anteriormente, o que é um equívoco. Também argumentaram que posteriormente a todas as medidas realizada, foi possível observar que a o instrumento de medição escolhido não possuía a resolução exigida para a obtenção da tolerância, o que também mostra desconhecimento dos alunos.

4 I CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia apresentada por este trabalho mostrou-se importante quando focado no desenvolvimento do aluno, os alunos mostraram mais interessados pelo assunto, devido à aplicação dos conceitos teóricos apresentados na etapa teórica da disciplina.

De um modo geral, a metodologia aplicada à turma de metrologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha apresentou-se satisfatória, dentro do planejado.

Ressalta-se que melhorias na metodologia mostrada precisam ser realizadas, quando focamos no desenvolvimento do projeto ao longo do semestre, mesmo com o acompanhamento do docente, em muitas vezes, os discentes não entregam as atividades parciais alegando grande número de desculpas e assim, acarretando no atraso de etapas e na não conclusão de algumas tarefas, como a etapa de calibração.

Outra importante melhoria que deverá ser realizada nos próximos semestres está

focada na apresentação dos exemplos práticos e variados da aplicação da incerteza de medição. Os grupos não conseguiram realizar essa etapa de modo satisfatório. Na apresentação de dois grupos, os valores apresentados no projeto estavam idênticos a exemplos aplicados em sala de aula, valores que não se aproximaram aos valores medidos.

Outro fator a ser destacado é a comparação entre os valores de incerteza de medição e os valores de tolerância, a comparação entre os valores, a qual foi realizada de modo insatisfatório. Todos os 4 grupos alegaram que se os valores de incerteza de medição e os de tolerância determinados inicialmente fossem distintos, o processo de medição usado e os componentes mecânicos não seriam aprovados dentro de um processo produtivo, o que é um equívoco.

Busca-se nos próximos trabalhos novas formas de aplicação de conceitos aplicados a metrologia, em que hajam interdisciplinaridade com outras disciplinas do curso de engenharia mecânica, assim podendo mostrar a aplicação de conceitos não só dentro da própria disciplina, mas em outras áreas de abrangência do curso.

REFERÊNCIAS

FARUOLO, L. B.; FERNANDEZ, J. L. A importância do ensino de metrologia, com foco na incerteza de medição, na formação de engenheiros. **XXXIII Congresso Brasileiro do Ensino de Engenharia** – COBENGE. Paraíba. 2005.

FERNANDEZ, Wilson D. *et al*. Metrologia e qualidade – sua importância como fatores de competitividade nos processos produtivos. **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão. Salvador, BA, Brasil, 2009.

INMETRO. **Portaria n.º 232, de 08 de maio de 2012**: Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Disponível em: <>. Acesso em 06 abr. 2020.

LEITE, W. S. S. Sociedade moderna e tecnologias na educação: Reflexões e perspectivas sobre a realidade no Brasil. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 15, n. 24, p. 105-212, jul./dez. 2014.

LIBÂNEO, J. C. **Adeus professor, adeus professora?**: Novas exigências educacionais e profissão docente. 7. ed. São Paulo: Cortez, 2003.

MORAN, J. Mudando a educação com metodologias ativas. **Coleção Mídias Contemporâneas**, v. II, 2015.

APLICAÇÃO DE MÉTODO DE GERENCIAMENTO DE PROJETOS PARA MELHORIA DE PROCESSO DE SOLDAGEM

Data de aceite: 02/01/2023

Sílvio Caixeta Rodrigues
Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/5818634379581301

Pedro Henrique Pires França
Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/5211853403558734

Wisley Falco Sales
Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/6214233322537821

Lohanna Ferreira Paiva
Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/7036607271994201

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia desenvolvida pelo Project Management Institute num trabalho de doutorado desenvolvido como parceria entre uma universidade pública e uma empresa privada, cujo objetivo foi produzir um sistema capaz de detectar o tipo de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG e ajustar essa transferência através do controle da tensão e corrente elétrica fornecidas pela fonte. Os princípios do gerenciamento de projetos foram descritos e utilizados para mostrar a gestão do trabalho frente à empresa. A utilização de uma metodologia reconhecida como essa garantiu planejamento adequado das funções e atividades, que por sua vez levaram a uma execução apropriada do projeto. Essa organização efetiva do trabalho não só assegura o sucesso do projeto, mas também fortalece a confiança e imagem da universidade frente ao setor privado.

PALAVRAS-CHAVE: PMI; PMBOK; Gerenciamento de Projetos; Melhoria de Processos; Gestão de Projetos; Projetos.

APPLYING PROJECT MANAGEMENT TO IMPROVE THE WELDING PROCESS

ABSTRACT: This work has the purpose to apply the methodology developed by the Project Management Institute in a Phd thesis developed as a partnership between a public university and a private company,

whose objective was to produce a system capable of detecting the type of metal transfer in the MIG/MAG welding process and adjust this transfer through voltage control and electric current supplied by the source. Project management principles have been described and used to show the management of the work in partnership with the company. The use of a recognized methodology such as this ensured proper planning of roles and activities, which in turn led to proper project execution. This effective organization of work not only ensures project success, but also builds trust and confidence. image of the university vis-à-vis the private sector.
KEYWORDS: PMI;PMBOK; Project Management; Process Improvement; Projects.

1 I INTRODUÇÃO

A 4ª Revolução Industrial é caracterizada pela integração e controle da produção a partir de sensores e equipamentos conectados em rede, viabilizando o emprego da inteligência artificial e envolvendo diversas etapas da cadeia de valor, desde o desenvolvimento de novos produtos (englobando projeto, desenvolvimento, testes, simulação das condições de produção) até o pós-venda. As empresas devem estar preparadas para modificar continuamente seus produtos e serviços, desenvolvendo atividades inovadoras a fim de se adaptarem as tendências de customização e flexibilização da produção; modularização dos produtos; e visão sistêmica dos custos cadeia produtiva (Carvalho, 2009). A implantação de um novo produto ou serviço, desde a decisão estratégica, passando pelo planejamento até chegar a fase de produção ou de entrega normalmente se passa na forma de um projeto. O PMI (*Project Management Institute*), que é a maior associação sem fins lucrativos do mundo voltada para profissionais da área de Gerenciamento de Projetos, define no PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*) (PMI, 2013) o projeto como sendo um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado, cujo término ocorre quando os objetivos são atingidos, ou porque seus objetivos não podem ou não serão alcançados, ou também quando a necessidade do projeto deixar de existir. Ainda, de acordo com a NBR ISO 10006-2000 (ABNT, 2000) o projeto consiste em um grupo de atividades coordenadas e controladas com datas para início e término, empreendido para alcance de um objetivo conforme requisitos específicos, incluindo limitações de tempo, custo e recursos.

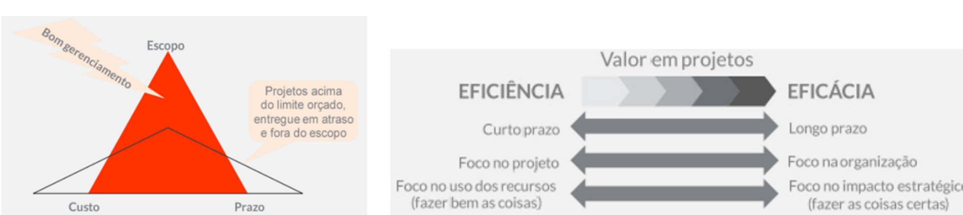


Figura 1. a) triângulo de ferro, à esquerda. b) eficiência e eficácia, à direita (Carvalho e Rabechini Jr., 2011)

Chiari e Oliveira (2014) afirmam que os projetos podem surgir como resultado de uma das seguintes necessidades: demanda de mercado, avanço tecnológico, solicitação do cliente, requisito legal, necessidade organizacional, necessidade social. Carvalho e Rabechini Jr (2011) dizem que o sucesso dependerá da eficiência, que é diferente da eficácia. A primeira é analisada frente as restrições de escopo (ou desempenho técnico), prazo e custo, podendo ser exemplificado pelo triângulo de ferro na Fig. 1a. A segunda tem relação com os impactos do projeto para a organização a longo prazo, como evidenciado na Fig. 1b. O bom gerenciamento de um projeto é essencial em sistemas mecatrônicos, que integram características de mecânica e eletrônica por meio da tecnologia da informação e produzem ganhos preciosos de qualidade e rentabilidade. Para Shetty e Kolk (2011) a demanda por sistemas autônomos inteligentes de inspeção, fabricação e tomadas de decisão, faz que a mecatrônica tenha papel fundamental no aperfeiçoamento dos processos de produção global, desde o projeto do produto até a inspeção da fabricação, integrando todas as informações em um banco de dados comum. A natureza multidisciplinar e complexa dessa área requer a integração de disciplinas de gestão de projeto e de negócios, além das de engenharia. Como fatores aparentemente independentes podem influenciar o comportamento do sistema, a exemplo da influência do estresse termomecânico e integridade estrutural nos componentes eletrônicos, Middendorf, et al., (2006) afirmam que a especificação do sistema deve considerar os parâmetros: requisitos, ambiente, funções, estrutura, forma, cenários de aplicação e comportamento, incluindo a interação com o usuário. Ainda, devem atender as necessidades de adensamento espacial, precisão de movimentos, facilidade de montagem, tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas, bom acabamento e simetria, de forma que as equipes devem estar preparadas para as tendências de redução dos ciclos de inovação e multiplicidade de funções dos produtos. O objetivo deste trabalho é mostrar um estudo de caso do gerenciamento do projeto de um sistema mecatrônico utilizando as diretrizes do guia PMBOK como base, descrevendo o ciclo de vida, os processos relacionados e as habilidades, ferramentas e técnicas para cada um.

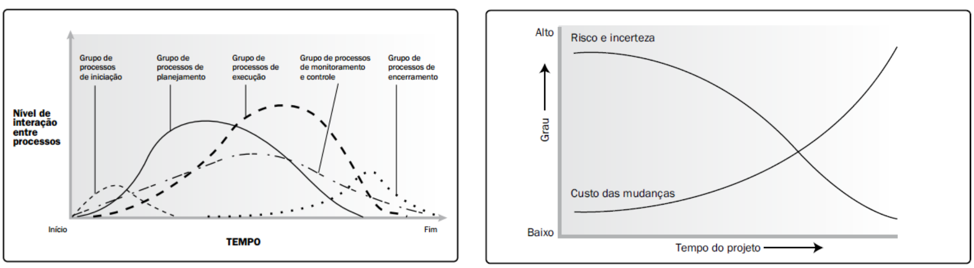
2 I METODOLOGIA

2.1 Gerenciamento de projetos

De acordo com o PMI (2017), gerenciar projetos é aplicar conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto a fim de cumprir os seus requisitos. Isso inclui: identificar requisitos; abordar as diferentes preocupações, necessidades e expectativas dos *stakeholders* no planejamento e na execução; estabelecer, manter e executar comunicações eficazes, ativas e colaborativas; gerenciar os *stakeholders* de modo a atender os requisitos do projeto e criar as entregas planejadas; equilibrar restrições conflitantes (escopo, qualidade, cronograma, orçamento, recursos e riscos). Para isso,

o gerente, que é o elo entre a estratégia implementada e a equipe de execução, deve possuir conhecimento técnico e de gestão de todas as áreas de conhecimento envolvidas, além de habilidades interpessoais como: liderança; construção de equipes; motivação; comunicação; influência; tomada de decisões; consciência política e cultural; negociação; gerenciamento de conflitos; e *coaching*.

O ciclo de vida do projeto é a série das fases que ele percorre até o seu fim. A estrutura básica de qualquer projeto envolve as fases de iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle, e encerramento, que normalmente agrupam processos inter-relacionados e interagem uma com a outra, como mostra a Fig. 2a. Tipicamente os recursos e pessoas envolvidas iniciam-se baixos, aumentam na fase de planejamento e tem seu pico na fase de execução. Um ponto importante é que embora os riscos e incertezas sejam maiores no início, a capacidade de influenciar as características finais dos produtos sem impacto significativo sobre os custos é mais alta, como visto na Fig. 2b. Isso significa que uma boa iniciação e planejamento podem evitar altos custos durante a execução decorrentes de alterações não programadas necessárias a realização do projeto.



(a) (b)

Figura 2. a) demanda de recursos e interação entre as fases. b) comparativo entre riscos e custo de mudanças em projetos (PMI, 2013)

Além da classificação por grupos (fases), os processos também podem ser classificados para gerenciamento por áreas do conhecimento: integração (desenvolver termo de abertura, desenvolver plano de gerenciamento, orientar, monitorar, e gerenciar o trabalho do projeto, realizar o controle integrado de mudanças, encerrar o projeto ou fase); escopo (coletar e detalhar requisitos, definir o que será entregue e como, criar Estrutura Analítica de Projeto ou EAP, verificar e controlar escopo); tempo (definir e sequenciar as atividades, estimar os recursos, desenvolver e controlar o cronograma); custos (estimar e controlar custos, definindo forma de gerenciamento e orçamento disponível); qualidade (planejar e controlar qualidade, medir desempenho geral do produto e do projeto para comparação com padrões); recursos humanos (planejar, mobilizar, desenvolver e liderar a equipe); riscos (identificar, controlar e fazer análise qualitativa e quantitativa de riscos e seus impactos, planejar resposta); aquisições (planejar, realizar e encerrar

compras e contratações, relacionar com fornecedores externos); partes interessadas (identificar, gerenciar e promover comunicação de pessoas, grupos ou organizações que podem impactar ou serem impactadas pelo projeto, compreender suas necessidades e expectativas, gerenciar conflitos de interesse e fomentar o engajamento).

2.2 Estudo de caso

O gerenciamento de projeto foi aplicado a um trabalho desenvolvido a nível de doutorado, cujo objetivo era construir um dispositivo de identificação do destacamento da gota durante processo de soldagem a arco e verificar a possibilidade de se realizar um controle básico da transferência metálica pelo processo MIG/MAG pulsado. Esse trabalho foi realizado por via de parceria entre a Universidade Federal de Uberlândia e a empresa A, de forma que os conceitos de gerenciamento de projetos foram aplicados para garantir organização e coordenação adequada do trabalho. Isso se traduz num projeto mais eficiente e com viés profissional, a fim de garantir satisfação dos *stakeholders*, sobretudo da empresa parceira.

3 | RESULTADOS

3.1 Grupos de processos de iniciação

3.1.1 Termo de abertura do projeto

O termo de abertura é o documento que formalmente autoriza a existência do projeto e dá ao seu gerente a autoridade necessária para aplicar recursos organizacionais às atividades do projeto. Esse termo apresenta a seguinte situação atual da empresa A e os objetivos da parceria: “Atualmente o processo de soldagem mais usado na Empresa A é o MIG/MAG, que tem elevada produtividade, boa qualidade da solda e flexibilidade (permite soldar todos metais e ligas comerciais em qualquer posição). Contudo, sua eficiência é muito dependente do tipo de transferência metálica que ocorre da ponta do eletrodo para a poça de fusão, e nem sempre um determinado tipo de transferência pode conseguir as características citadas. A Empresa A trabalha com os três tipos de transferência metálica da soldagem MIG/MAG: curto-circuito, globular e goticular. A transferência por curto-circuito permite a soldagem de chapas finas e em qualquer posição, mas sua produção é baixa e normalmente gera muitos respingos. A goticular proporciona boa estabilidade do arco e possibilita soldas com elevadas propriedades e bom acabamento superficial. Visando alinhar as vantagens desses dois tipos de transferência, o objetivo desse trabalho é o desenvolvimento do processo de transferência MIG/MAG pulsado”.

3.1.2 Identificação das partes interessadas

Nesse processo são identificados pessoas, grupos ou organizações que podem ter

impacto ou serem impactados por uma decisão, atividade ou resultado do projeto. São analisadas e documentadas informações relevantes relativas aos seus interesses, nível de engajamento, interdependências, e como reagirão a diferentes situações.

Empresa	**Participante**	**Função**
UFU	Coordenador de Equipe	Equipe de Projeto
UFU	Gerente de Projeto	Gerente de Projeto
UFU	Professor A	Consultor
UFU	Professor B	Consultor
UFC	Professor C	Consultor
UFU	Técnico 1	Equipe Técnica
UFU	Técnico 2	Equipe Técnica
UFU	Coordenador de curso Engenharia Mecânica	Consultor
UFU	Coordenador de curso Engenharia Mecatrônica	Consultor
A	Engenheiro A	Patrocinador

Tabela 1. Identificação das partes interessadas e suas funções

3.2 Grupos de processos de planejamento

3.2.1 Gerenciamento do escopo do projeto

O escopo define o trabalho que deve ser feito para liberar o produto com as funcionalidades especificadas. Esse trabalho foi dividido em etapas, a partir das quais definiu-se as atividades necessárias para atingir as entregas necessárias. Os desdobramentos são apresentados na EAP, conforme Fig. 3. O dicionário da EAP explica as atividades dentro de cada etapa, conforme Tab. 2.

Etapa 1) Testes preliminares	Etapa 2) Avaliação do sensor óptico
1.1. Construção do circuito elétrico de alimentação do sensor óptico	2.1. Experimentação do sistema de detecção para diferentes materiais
1.2. Testes iniciais do dispositivo de identificação	2.1.1. Ensaios utilizando aço de baixo carbono
1.3. Verificação da possibilidade de detecção da transferência metálica	2.1.2. Transferência de +UGPP e –UGPP
1.4. Desenvolvimento da fixação do sensor óptico	2.2. Análise dos Resultados
1.5. Avaliação das características de posicionamento e de ajuste do circuito elétrico do sensor	
Etapa 3) Ensaios de exploração	**Etapa 4) Sistema de reconhecimento da transferência metálica através de redes neurais**
3.1. Soldagem de aço baixo carbono	4.1. Caracterização do problema de classificação da transferência metálica
3.1.1. Avaliação do efeito do diâmetro do arame e dos ajustes dos parâmetros de pulsação	4.2. Considerações sobre as aplicações das Redes PNN
3.1.2. Avaliação do efeito de diferentes gases de proteção e dos ajustes dos parâmetros de pulsação	4.3. Avaliação da Rede PNN na classificação da transferência metálica para soldagem de alumínio
3.2. Soldagem de alumínio	4.4. Associação do sinal do sensor óptico com a condição da transferência metálica
3.2.1. Avaliação do efeito do tipo de liga do material de adição e dos ajustes dos parâmetros de pulsação	4.5. Tratamento matemático do sinal do sensor óptico
3.2.2. Avaliação da influência da configuração da junta e dos parâmetros de pulsação sobre o sinal luminoso	4.6. Criação das Redes PNN
3.3. Soldagem de aço inoxidável	4.7. Estudo da quantidade de pulsos
3.3.1. Avaliação do efeito do gás de proteção e dos ajustes dos parâmetros de pulsação	4.8. Estudo do número de divisões de cada pulso
3.3.2. Avaliação do efeito da DBCP sobre o sinal do sensor óptico	4.9. Estudo da melhor representação matemática do pulso
3.3.3. Simulação de uma soldagem semi-automática com oscilação da tocha de soldagem	4.10. Funcionamento da Rede PNN empregada
Etapa 5) Implementação do Sistema de Controle do Processo MIG/MAG Pulsado	
5.1. Considerações sobre o sistema de controle do processo MIG/MAG pulsado	
5.2. Descrição de um ciclo de atuação do sistema de controle	
5.3. Validação do sistema de controle	

Tabela 2. Etapas do projeto e atividades dentro de cada uma.

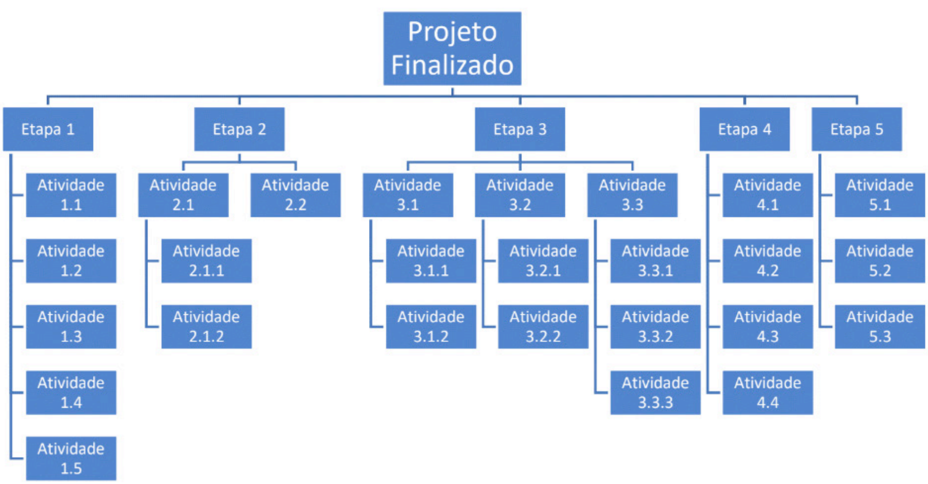
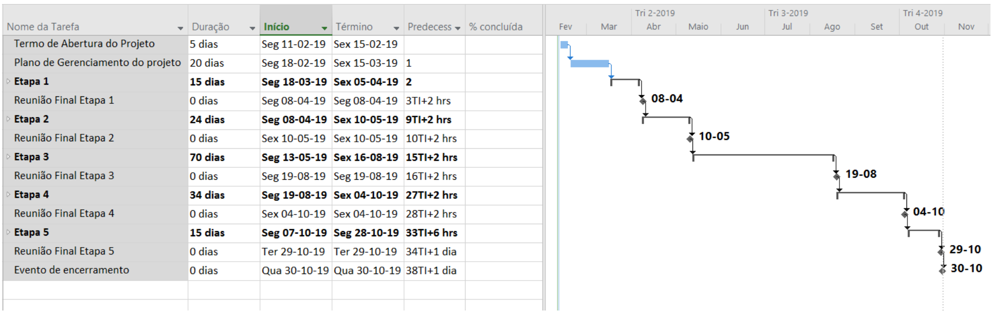


Figura 3. Estrutura Analítica do Projeto com etapas e atividades

3.2.2 Gerenciamento do cronograma do projeto

Nesse projeto foi usado modelo de sequenciamento de atividades término-início, onde deve-se necessariamente finalizar a primeira atividade para iniciar a segunda. Dada

a experiência prévia da equipe, foi usada a técnica de estimativa análoga para estimar a duração de cada atividade. O cronograma foi feito no software *Microsoft Project*, que gerou o gráfico de *Gantt* do projeto, onde pode ser visto a linha do tempo com as durações e datas de início e término, mostrado na Fig. 4. A duração total é de nove meses, e qualquer mudança feita na planilha é acompanhada pelas partes interessadas.



Nome da Tarefa	Duração	Início	Término	Predecess	% concluída
Termo de Abertura do Projeto	5 dias	Seg 11-02-19	Sex 15-02-19		
Plano de Gerenciamento do projeto	20 dias	Seg 18-02-19	Sex 15-03-19	1	
Etapa 1	**15 dias**	**Seg 18-03-19**	**Sex 05-04-19**	**2**	
Reunião Final Etapa 1	0 dias	Seg 08-04-19	Seg 08-04-19	3TI+2 hrs	
Etapa 2	**24 dias**	**Seg 08-04-19**	**Sex 10-05-19**	**9TI+2 hrs**	
Reunião Final Etapa 2	0 dias	Sex 10-05-19	Sex 10-05-19	10TI+2 hrs	
Etapa 3	**70 dias**	**Seg 13-05-19**	**Sex 16-08-19**	**15TI+2 hrs**	
Reunião Final Etapa 3	0 dias	Seg 19-08-19	Seg 19-08-19	16TI+2 hrs	
Etapa 4	**34 dias**	**Seg 19-08-19**	**Sex 04-10-19**	**27TI+2 hrs**	
Reunião Final Etapa 4	0 dias	Sex 04-10-19	Sex 04-10-19	28TI+2 hrs	
Etapa 5	**15 dias**	**Seg 07-10-19**	**Seg 28-10-19**	**33TI+6 hrs**	
Reunião Final Etapa 5	0 dias	Ter 29-10-19	Ter 29-10-19	34TI+1 dia	
Evento de encerramento	0 dias	Qua 30-10-19	Qua 30-10-19	38TI+1 dia	

Figura 4. Gráfico de *Gantt* mostrando os detalhes do cronograma do projeto

3.2.3 Gerenciamento dos custos

Os custos foram levantados também por estimativa análoga, divididos entre recursos humanos e materiais, conforme a Fig. 5. Adicionando-se uma reserva de contingência ao custo total como margem de segurança, a UFU e a empresa A acordaram um orçamento de R$80 000,00.

Custos				
Recursos		Quantidade/Horas trabalhadas	Preço/ Taxa padrão(trabalho por hora)	Custos por recurso
Recursos Humanos	Técnico 1	1264	R$ 17,00	R$ 21.488,00
	Técnico 2	1264	R$ 17,00	R$ 21.488,00
	Técnico 3	1264	R$ 17,00	R$ 21.488,00
Materiais	Fonte de soldagem	1	R$ 400,00	R$ 400,00
	Sistema de alimentação do arame eletrodo	1	R$ 200,00	R$ 200,00
	Mesa de deslocamento e fixaçao do corpo de prova	1	R$ 500,00	R$ 500,00
	Conjunto de geração e armazenamento de imagens	1	R$ 1.000,00	R$ 1.000,00
	Conjunto de aquisição e sincronização dos sinais do sensor óptico, da tensão e da	1	R$ 1.000,00	R$ 1.000,00
	Itens de consumo		R$ 50,00	R$ 0,00
	Arames eletrodos		R$ 50,00	R$ 0,00
	Gás de proteção		R$ 50,00	R$ 0,00
	Corpo de prova		R$ 50,00	R$ 0,00
			CUSTO TOTAL	R$ 67.564,00

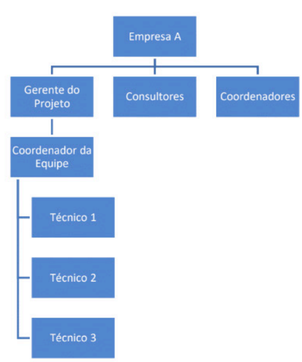
Figura 5. Planilha para estimativa dos custos do projeto, a fim de determinar o orçamento total

3.2.4 Gerenciamento dos recursos humanos do projeto

Foram definidos o responsável e os revisores para cada etapa do projeto na matriz de responsabilidades, apresentada na Fig. 6a. A relação hierárquica das partes interessadas está descrita no organograma da Fig. 6b. A empresa A ocupa a posição mais alta pois é o cliente do projeto, que financia os custos em troca de ter suas necessidades atendidas.

Entrega/Pacote de Trabalho	Responsável	Revisor
Termo de Abertura do Projeto	Gerente de Projeto	Empresa A/Consultores/Coordenadores
Plano de Gerenciamento do projeto	Gerente de Projeto	Empresa A/Consultores/Coordenadores
Etapa 1	Equipe Técnica	Coordenador de Equipe
Reunião Final Etapa 1	Coordenador de Equipe	Gerente de Projeto
Etapa 2	Equipe Técnica	Coordenador de Equipe
Reunião Final Etapa 2	Coordenador de Equipe	Gerente de Projeto
Etapa 3	Equipe Técnica	Coordenador de Equipe
Reunião Final Etapa 3	Coordenador de Equipe	Gerente de Projeto
Etapa 4	Equipe Técnica	Coordenador de Equipe
Reunião Final Etapa 4	Coordenador de Equipe	Gerente de Projeto
Etapa 5	Equipe Técnica	Coordenador de Equipe
Reunião Final Etapa 5	Coordenador de Equipe	Gerente de Projeto
Projeto finalizado	Coordenador de Equipe	Gerente de Projeto/Empresa A

(a)



(b)

Figura 6. a) Matriz de responsabilidades do projeto, com o responsável e o revisor de cada etapa do projeto. b) Organograma com as partes envolvidas e sua posição hierárquica

3.2.5 Gerenciamento da comunicação

Foi estabelecido que à medida em que o projeto fosse executado, ao final de cada atividade o coordenador técnico faria atualizações para o gerente de projeto. Após o final de cada etapa, haveria uma reunião com o patrocinador do projeto para avaliação das entregas, e qualquer comunicação intermediada seria registrada na planilha “Plano de Comunicação”. Segundo Chiari e Oliveira (2014) e o relatório do PMI (2012), a falta de comunicação é um dos maiores entraves ao sucesso de um projeto, por isso é importante que após cada reunião o entendimento seja confirmado e a discussão seja sumarizada e recapitulada, junto com a definição dos próximos passos.

Parte Interessada	Nível de Engajamento	Estratégias para ganhar mais suporte ou reduzir resistências	Avaliação do impacto e comentários
Empresa A	Lidera	Garantir que ele fique por dentro das entregas produzidas e não perca nenhuma informação produzida ao longo do projeto	Como patrocinador, garante que os recursos sejam disponibilizados para o desenvolvimento do projeto
Gerente do Projeto	Lidera	Garantir engajamento de todos interessados, atualizando todos de forma adequada ao seu interesse no projeto	
Coordenador de equipe	Lidera	Manteve atualizado diretamente o gerente de projeto e identificava qualquer resistência de sua equipe técnica	Pelo fácil contato com sua equipe técnica, garante o desenvolvimento das atividades de forma a atingir a qualidade necessária das entregas
Equipe Técnica	Apoiador	Contato direto com o Coordenador de Equipe	Pela experiência nesses projetos, garantirão as entregas
Coordenadores	Apoiador	Manteve atualizado diretamente o gerente de projeto e identificava qualquer resistência de sua equipe técnica	Estão avaliando se o projeto desse nível faz sentido para o departamento de Engenharia do curso

Figura 7. Planilha com as partes interessadas, nível de engajamento e a estratégia para o gerente de projeto e coordenador de equipe lidarem com cada uma

3.2.6 Gerenciamento das partes interessadas

No projeto foram consideradas todos os interesses, expectativas e a influência de cada parte interessada. Após essa análise foi feito um estudo pelo gerente do projeto, para que se pudesse antecipar todas as demandas de cada uma delas e como reagiriam a eventos não planejados. Assim, foram descritas estratégias para garantir o apoio de cada parte, como mostra a Fig. 7.

3.2.7 Outros itens para gerenciamento

O gerenciamento da qualidade do projeto foi feito a partir do objetivo disposto no termo de abertura. Baseando-se na estratégia definida pelos consultores e pelo engenheiro da empresa A de acordo com seu *know-how*, os macro objetivos foram detalhados como “Desenvolvimento de um sistema de identificação da transferência metálica no MIG/MAG pulsado baseado nas variações da intensidade luminosa do arco; Implementação de um sistema básico de controle da transferência metálica no MIG/MAG pulsado, a partir de sensor óptico, visando obter a condição de UGPP independente das instabilidades que possam ocorrer durante a soldagem”. Os requisitos de cada etapa foram então definidos na

EAP, sendo que na reunião após cada atividade o gerente de projeto e a empresa A deveriam verificar se os requisitos de qualidade foram atendidos ou não, e se alguma atividade deveria ser revista ou refeita. A gestão das aquisições ficou a cargo do coordenador de equipe, do gerente de projeto e do engenheiro da empresa A. O primeiro seria responsável por levantar três orçamentos (fornecedores e custos) para cada um dos produtos e serviços, enquanto os outros dois definiriam juntos qual seria adquirido e seriam responsáveis pela compra. Na parte de gerenciamento de riscos, tendo em vista que se trata de um projeto de âmbito acadêmico cujos envolvidos são familiares ao escopo de projeto e tem ampla experiência trabalhando juntos, nenhum risco substancial foi identificado. De toda forma, o gerente de projeto ficou como responsável por avaliar os feedbacks de todas as partes interessadas, e caso seja identificado algum risco, registrá-lo e fazer uma avaliação mais profunda dos possíveis impactos. Em relação a gestão de mudanças no escopo, foi definido que toda mudança deverá ser solicitada através de um formulário e enviada ao gerente do projeto por e-mail, o qual fará sua avaliação, incluirá num registro de mudanças e encaminhará para aprovação do patrocinador. O registro, mostrado na Fig. 8, ficará na pasta do projeto e conterá todas as solicitações com seu status atualizado, mesmo as que sejam rejeitadas.

Aprovações		
Participante	**Assinatura**	**Data**
Patrocinador do Projeto		
Gerente do Projeto		

Figura 8. Registro das mudanças de escopo solicitadas por alguma das partes interessadas

3.3 Grupos de processo de execução, monitoramento e controle

Os processos dessas etapas foram realizados conforme estabelecido na fase de projeto. Para acompanhamento das atividades em relação a prazo, qualidade, mudanças de escopo e orçamento foram utilizados os softwares *Microsoft Project* e *Microsoft Excel*. Os experimentos realizados ao longo do projeto juntamente com suas finalidades são apresentados na Tab. 3. O alcance desses fins foi estabelecido como parâmetro para verificação da qualidade.

Experimentos práticos	Propósito
Construção do sistema eletrônico de alimentação e de saída do sensor óptico e seleção dos filtros;	Analisar as necessidades de alimentação do sensor e de implementação de filtros para o sinal de saída do mesmo.
Testes iniciais do dispositivo de identificação;	
Verificação da possibilidade de detecção da transferência metálica;	Verificar a possibilidade de detecção, num primeiro momento sem filmagem em alta velocidade e depois com filmagem em alta velocidade para cada ensaio, para garantir a análise mais detalhada.
Preparação do sistema de identificação do sensor;	Adequação do sistema de identificação do sensor às condições adversas de soldagem.
Avaliação das características de posicionamento e de ajuste do circuito eletrônico do sensor;	Estabelecer as condições de posicionamento mais adequadas possíveis ajustes que deveriam ser feitos no circuito eletrônico para otimizar o dispositivo de identificação do sensor óptico.
Avaliação do sistema de identificação do sensor óptico para diferentes condições no MIG/MAG pulsado;	
Experimentação com sistema de detecção;	Realização de testes que envolviam transferência de menos de uma gota (-UGPP), uma gota (UGPP) e mais de Uma Gota Por Pulso (+UGPP).
Reconhecimento automático da condição de destaque da gota;	Averiguar a possibilidade de identificação para materiais que poderiam apresentar um comportamento diferente no ciclo de transferência, quando considerado o aspecto de variação luminosa.
Tentativa de desenvolvimento de um sistema básico de controle automático da transferência metálica;	
Validação do sistema de controle;	

Tabela 3. Experimentações feitas e suas finalidades

O desenvolvimento da equipe ao longo do projeto se deu através de treinamentos e pela boa prática de os membros mais experientes replicarem seus conhecimentos aos outros participantes. Em relação ao gerenciamento, o gerente de projeto foi responsável por avaliar o desempenho individual e fornecer feedbacks constantes aos membros, seja positivo ou negativo, a fim de contribuir para o desenvolvimento pessoal das partes.

O monitoramento e controle foi feito ao longo de todo o projeto, de forma que o desempenho real foi comparado pelo gerente de projeto ao que se previu no planejamento, baseando-se nas experiências prévias do gerente de projeto e do engenheiro da empresa A. Nesse ponto, os programas computacionais citados foram de extrema importância por permitir acompanhamento simultâneo e gestão das partes interessadas através de compartilhamento sincronizado de arquivos. Todas as orientações e observações pertinentes estavam registradas nas planilhas e podiam ser acessadas a qualquer momento para verificação.

O encerramento formal do projeto se deu com a documentação e armazenamento do conhecimento técnico desenvolvido, além de uma reunião formal das partes que lideraram o projeto. Nesse evento é feito o aceitamento formal do projeto desenvolvido, junto com a liberação da equipe e celebração do sucesso do projeto, constatado com a apresentação do produto em operação perfeitamente funcional.

4 | CONCLUSÕES

A aplicação do gerenciamento de projetos num caso real permitiu a constatação de como cada processo é desenvolvido, quem são os responsáveis e quais ferramentas são aplicadas. Assim, pôde-se ter uma clareza maior da metodologia apresentada pelo guia PMBOK, descrevendo e classificando os processos envolvidos de acordo com as fases

do projeto. As atividades apresentadas mostram que as áreas do conhecimento interagem entre si e são interdependentes, mesmo quando as fases do projeto são lineares.

Alguns processos não demandaram tanta ênfase, como nos casos do gerenciamento dos processes de execução, monitoramento e controle, e encerramento. Nesses casos foi apenas executado aquilo que já havia sido programado nas fases de planejamento. Em projetos mais complexos, essas fases demandarão mais atenção. Em relação aos processos de gestão de qualidade, aquisições e riscos, que também foram menos detalhados dentro do planejamento, o mais importante foi delimitar o responsável por cada processo.

A aplicação da metodologia recomendada pelo PMI para gerenciamento de projetos foi fundamental para transmitir confiança e segurança ao investidor, garantindo comunicação eficiente e execução das atividades com a qualidade requerida. Esse trabalho serve como base para aplicação dessa estratégia em outros empreendimentos acadêmicos, o que facilitaria o estabelecimento de parcerias entre empresas privadas e universidades públicas. Essa cooperação se torna uma necessidade básica frente a situações de escassez de recursos financeiros e pode representar um mecanismo importante para continuação das pesquisas nas instituições públicas de ensino.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR ISO 10006-2000: Gestão da Qualidade – Diretrizes para a Qualidade no Gerenciamento de Projetos.

Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2000.

Carvalho, M. M. e Rabechini Jr., R., 2009. Construindo competências para gerenciar projeto: teorias & casos. Atlas, São Paulo, 2ª edição.

Carvalho, M. M. e Rabechini Jr., R., 2011. Fundamentos em Gestão de Projetos: Construindo competências para gerenciar projetos. Atlas, São Paulo, 3ª edição.

Chiari, R. e Oliveira, A. B., 2014. Fundamentos em Gerenciamento de Projetos Baseado no PMBOK 5ª edição. Communit, 1ª edição.

Middendorf, A., Deyter, A., Gausemeier, J., Nissen, N. F., Reichl, H., 2009. “Integration of reliability and environmental aspects in early design stages of mechatronics.” In Proceedings of the IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology – IEEE2009, Phoenix, Estados Unidos.

PMI, 2012. “PMSURVEY.ORG – A global initiative of PMI Chapters – Relatório Mundial” Project Management Institute. 2 Jan. 2019 < www.pmsurvey.org >.

PMI, 2013. Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK®). Project Management Institute, Pensilvânia, 5ª edição.

PMI, 2017. Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK®). Project Management Institute, Pensilvânia, 7ª edição.

Shetty, D. e Kolk, R. A, 2011. Mechatronics System Design, CENGAGE, Stamford, 2a edição

ESTUDO DA LIGA TI-30NB-5MO APLICADA EM IMPLANTES ORTOPÉDICOS

Data de submissão: 08/11/2022

Data de aceite: 02/01/2023

Alexandra de Oliveira França Hayama
Universidade Federal de Rondonópolis, Engenharia Mecânica
Rondonópolis – MT
http://lattes.cnpq.br/6333256547674137

Magna Bibiano de Oliveira
Centro Universitário de Maringá - Unicesumar
Rondonópolis – MT
http://lattes.cnpq.br/5601418956250383

Aguinaldo Soares de Oliveira
Universidade Federal de Rondonópolis, Engenharia Mecânica
Rondonópolis – MT
http://lattes.cnpq.br/7771470538635423

RESUMO: A aplicação de um material como implante permanente no corpo humano requer que o mesmo apresente um conjunto de propriedades e características que inclua além da compatibilidade em termos físicos e mecânicos com o tecido a ser substituído, biocompatibilidade, resistência à corrosão e principalmente, disponibilidade. No caso de materiais metálicos a serem empregados em implantes ortopédicos constata-se que algumas ligas de titânio podem atender satisfatoriamente a esses requisitos, como as ligas de titânio do tipo β. Tais ligas possuem alta dureza, excelente resistência à corrosão e valores de módulo de elasticidade próximos ao do osso, além disso, são compostas por elementos não tóxicos e biocompatíveis. Neste projeto é estudada a liga Ti-30Nb-5Mo (% em peso), para isso, lingotes de cerca de 50g cada foram fundidos em forno arco voltaico, seguido de encapsulamento em tubos de quartzo sob vácuo e homogeneização a 1.000ºC/8 horas, sendo na sequência resfriados rapidamente em água com a quebra dos tubos. Após esse procedimento os lingotes foram laminados a frio até a máxima deformação conseguida. Após laminação, as amostras foram recozidas a 700°C/60 min e na sequência envelhecidas a 260°C em tempos variáveis. Os tratamentos térmicos de recozimento e envelhecimento foram conduzidos com as amostras encapsuladas em tubos de quartzo sob vácuo. A caracterização mecânica da liga foi realizada utilizando as técnicas de dureza Vickers e medidas de módulo de elasticidade via ensaio de emissão acústica (ultrassom) e a caracterização microestrutural foi realizada via microscopia óptica e medidas de tamanho de grão pelo Método do Intercepto Linear de Heyn.

Os principais resultados mostram a presença de bandas de cisalhamento nas amostras encruadas, a ocorrência de recristalização das amostras recozidas e uma variação no módulo de elasticidade e na dureza Vickers nas amostras envelhecidas, que está relacionada à precipitação de diferentes fases que ocorre durante o envelhecimento.
PALAVRAS-CHAVE: Módulo de elasticidade, Ligas de titânio, Deformação plástica, Envelhecimento.

STUDY OF THE TI-30NB-5MO ALLOY APPLIED IN ORTHOPEDIC IMPLANTS

ABSTRACT: The application of a material as a permanent implant in the human body requires that it presents a set of properties and characteristics that include, in addition to physical and mechanical compatibility with the tissue to be replaced, biocompatibility, corrosion resistance and, mainly, availability. In the case of metallic materials to be used in orthopedic implants, it appears that some titanium alloys can satisfactorily meet these requirements, such as β-type titanium alloys. Such alloys have high hardness, excellent corrosion resistance and elastic modulus values close to bone, in addition, they are composed of non-toxic and biocompatible elements. In this work, is studied the Ti-30Nb-5Mo alloy (% by weight), for that, ingots of about 50g each were melted in an electric arc furnace, followed by encapsulation in quartz tubes under vacuum and homogenization at 1000ºC/8 hours, followed by quenching in water with the tubes breaking. After this procedure, the ingots were cold rolled until the maximum deformation achieved. After lamination, the samples were annealed at 700°C/60 min and then aged at 260°C at varying times. The annealing and aging heat treatments were carried out with the samples encapsulated in quartz tubes under vacuum. The mechanical characterization of the alloy was carried out using Vickers hardness techniques and elastic modulus measurements by acoustic emission testing (ultrasound) and microstructural characterization was carried out by optical microscopy and grain size measurements by the Heyn Linear Intercept Method. The main results show the presence of shear bands in the work-hardened samples, the occurrence of recrystallization of the annealed samples and a variation in the Young's modulus and Vickers hardness in the aged samples, which is related to the precipitation of different phases that occurs during aging.
KEYWORDS: Young's modulus, Titanium alloys, Plastic deformation, Aging.

1 | INTRODUÇÃO

As ligas de titânio apresentam resistência à corrosão, elevada dureza, boa combinação de propriedades físicas e químicas, biocompatibilidade, são paramagnéticas e possuem excelente relação resistência/peso. A combinação desses fatores faz com que as ligas de titânio sejam cada vez mais aplicadas na área biomédica (XU *et al.*, 2012). Além disso, destacam-se por possuir propriedades mecânicas que podem ser modificadas por meio de processamentos termomecânicos, que resultam na obtenção de microestruturas otimizadas em relação ao tipo, morfologia e distribuição de fases (ANKEM, GREENE, 1999; BANERJEE, NAG, FRASER, 2005).

Materiais usados como implantes permanentes no corpo humano devem exibir

resistência à corrosão, biocompatibilidade, ser cooperativo com a integração óssea, ser biofuncional, apresentar elevada resistência à fadiga e baixo módulo de elasticidade (TAMIRISAKANDALA, VEDAM, BHAT, 2003). O módulo de elasticidade é uma propriedade importante que deve ser considerada ao se desenvolver um material para ser aplicado como biomaterial estrutural, sendo que este deve ser similar ao do osso humano (20 a 40 GPa, (TANE *et al.*, 2008)), pois quando são utilizados materiais com módulos de elasticidade muito superiores ao do osso para a confecção de implantes, ocorre transferência insuficiente da tensão para o osso, podendo gerar degradação óssea e consequentemente, osteoporose (TARR *et al.*, 1983).

No campo biomédico, o titânio comercialmente puro (CP) e a liga Ti-6Al-4V são usados desde a década de 1960. Porém, para substituir estruturas ósseas, as propriedades mecânicas apresentadas pelo titânio CP não são satisfatórias, sendo utilizada a liga Ti-6Al-4V para a confecção de componentes como chapas e parafusos. Reservas têm sido feitas a respeito da presença, em implantes de longo prazo, de elementos, como o vanádio e o alumínio, pois o vanádio é tóxico, podendo causar danos à saúde do implantado (EISENBARTH *et al.,* 2004) e o alumínio também pode ser prejudicial, podendo causar desordens no sistema neurológico do implantado (SILVA, SCHNEIDER, MOURA NETO, 2004). Além disso, liga Ti-6Al-4V apresenta elevado módulo de elasticidade (aproximadamente de 110 GPa), o que têm levado ao desenvolvimento das ligas de titânio do tipo β (EISENBARTH *et al.*, 2004).

Na década de 1980 iniciou-se o desenvolvimento de implantes de ligas de titânio a+b livres de vanádio, como a Ti-6Al-7Nb e Ti-5Al-2.5Fe, com propriedades mecânicas e metalúrgicas similares às da liga Ti-6Al-4V (NIINOMI, HATTORI, NIWA, 2004), mas que ainda possuem alumínio em sua composição química. Outros materiais, como os aços inoxidáveis e as ligas Cr-Co-Mo, que também são utilizados na confecção de implantes ortopédicos, possuem módulo de elasticidade elevado, próximo a 200 GPa e valores superiores a 240 GPa, respectivamente.

As ligas de titânio do tipo β são compostas por elementos não tóxicos e biocompatíveis, como o nióbio e o molibdênio, podendo ser usadas como materiais de implantes permanentes no corpo humano. Apresentam baixo módulo de elasticidade, podendo variar de 55 a 85 GPa, para algumas ligas de titânio do tipo β (NIINOMI, 1998). Além disso, são compostas por elementos não tóxicos e biocompatíveis, como o Nb e o Mo. Desse modo, as características físicas, químicas e mecânicas das ligas de titânio tipo β mostram que essas apresentam potencial para substituir, em um futuro próximo, as ligas do tipo α+β na fabricação de implantes ortopédicos, visto que podem ter suas propriedades mecânicas aprimoradas mediante tratamentos termomecânicos, apresentando ainda propriedades adequadas no tocante à biocompatibilidade.

Ademais, a presente pesquisa vai de encontro às necessidades apresentadas pela população brasileira que, cada vez mais aumenta sua expectativa de vida, e isso faz com

que naturalmente aumente também a necessidade do uso de implantes ortopédicos, devido ao envelhecimento da população e ao desgaste das articulações. O desenvolvimento de materiais apropriados para a utilização como material de implante é de interesse público, pois com novos materiais desenvolvidos, o bem-estar da população e o desenvolvimento do país nesse campo se tornam mais efetivos, aumentando a qualidade de vida das pessoas que necessitam desses implantes, uma vez que a liga de titânio tipo β estudada é composta por elementos biocompatíveis, como o nióbio e o molibdênio, não causando efeitos nocivos uma vez implantada nos pacientes.

2 I METODOLOGIA

O material de partida consiste em lingotes de 50g cada, fundidos em um conjunto que tem como principal parte, um forno de fusão a arco voltaico com atmosfera controlada. Após a fusão, os lingotes foram encapsulados em tubos de quartzo sob vácuo e, em seguida, submetidos ao tratamento térmico de solubilização, que consiste no aquecimento do material à temperatura de 1.000°C por 8 horas, seguido de têmpera em água, com a quebra simultânea do tubo quartzo. Após este tratamento térmico, amostras da liga Ti-30Nb-5Mo (% em peso) foram deformadas por laminação a frio até a máxima deformação conseguida que foi igual a 86% de redução de espessura, sem recozimento intermediário.

As amostras laminadas foram cortadas e seladas em tubos de quartzo sob vácuo e recozidas a 700°C por 60 min, em seguida foram envelhecidas a 260ºC, os tempos considerados foram 1, 15, 30, 60, 120 e 240 min, o resfriamento em ambos tratamentos térmicos foi realizado dentro dos tubos de quartzo ao ar. Em seguida foi realizada a preparação metalográfica das amostras, sendo analisada a seção transversal das mesmas, de acordo com o mostrado na Figura 1.

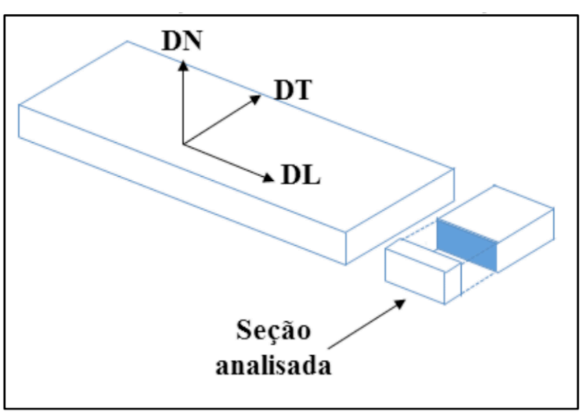


Figura 1: Desenho esquemático mostrando a retirada das amostras após laminação a frio. DN: direção normal; DT: direção transversal; DL: Direção de laminação.

Fonte: Os Autores.

A análise microestrutural foi realizada via microscopia óptica e medidas de tamanho de grão foram feitas segundo o Método do Intercepto Linear de Heyn, de acordo com a norma ASTM E 112-96/2004. Para que tivesse uma boa estatística de medida procurou-se medir a maior quantidade de grão possível, desta forma foram medidos em média 500 grãos utilizando cerca de três micrografias para isso.

O comportamento mecânico foi avaliado mediante ensaio de dureza Vickers, sendo que os valores resultantes representam a média de 10 medições, utilizando um 98 gf aplicado por 20s, e medições do módulo de elasticidade pelo método ultrassônico, para isso foi utilizado um ecoscópio ultrassônico marca Panametrics-NDT, modelo 5072 PR, com uso de transdutores de 5 MHz.

No ensaio de emissão acústica utilizado neste estudo, são empregados dois tipos de transdutores piezoelétricos, um que gera ondas longitudinais e outro que gera ondas transversais. Nas ondas longitudinais, as partículas do meio vibram no sentido de propagação da onda e nas transversais, a vibração ocorre perpendicularmente à direção de propagação da onda. O ultrassom é transmitido através da amostra e é refletido ao atingir uma descontinuidade, após a reflexão, a onda refletida retorna ao transdutor piezoelétrico. A diferença de tempo (defasagem) entre a onda emitida e a onda recebida é lida mediante a utilização de um osciloscópio.

3 I RESULTADOS

Os resultados foram agrupados em 4 grupos, sendo eles: caracterização da liga Ti-30Nb-5Mo na condição inicial, seguida da caracterização na condição laminada a frio, recozida e, por fim, envelhecida.

3.1 Caracterização da liga na condição inicial

A condição inicial da liga estudada caracteriza-se pelas amostras que foram fundidas em um forno a arco voltaico, tratadas termicamente a 1000ºC por 8 h e resfriadas rapidamente em água, sendo deste modo, correspondente às amostras solubilizadas. Este tratamento térmico permite que se tenha a presença da fase β em temperatura ambiente, visto que essa fase ocorre em temperaturas acima de 882ºC.

Mediante análise da microestrutura da liga constatou-se que a mesma é constituída majoritariamente pela fase β (CCC), com pequenas quantidades da fase α” (martensíta ortorrômbica). A formação da fase α” está ligada ao resfriamento rápido em ligas com elevado teor de elementos β-estabilizadores homogeneizadas no campo de fases β. A Figura 2 uma micrografia da amostra na condição inicial destacando-se as fases α” e b.

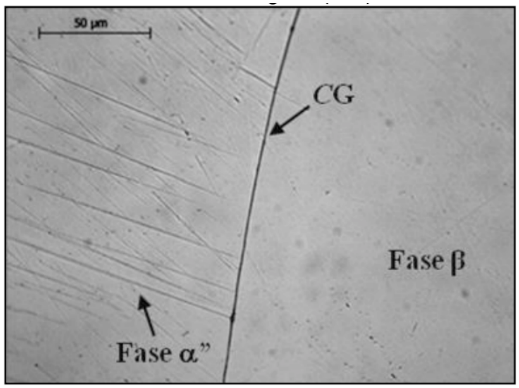


Figura 2: Microestrutura na condição inicial apresentando as fases β e α” em destaque, e o contorno de grão (CG).

Fonte: Os Autores.

O método do intercepto linear de Heyn foi utilizado para a obtenção do tamanho médio dos grãos do material. O índice ASTM (G) que determina o tamanho de grão varia de 00 a 14, lembrando que quanto mais próximo de 14 é o índice, menor é o tamanho de grão, ou seja, mais próximo de 2,8 μm estará o tamanho do grão. Segundo Padilha e Siciliano Jr (2005), este fator está ligado diretamente com o comportamento do material frente à deformação plástica, pois interfere na densidade de discordâncias e na resistência mecânica do mesmo. Callister Jr (2013), complementa que esse comportamento está relacionado com a área de contorno de grão, uma vez que os materiais que apresentam granulação mais fina possuem maior área de contorno de grão, servindo de barreira para a movimentação de discordâncias.

O tamanho médio do grão do material foi obtido de acordo com norma ASTM E112-96/2004. Para que tenha uma boa estatística procurou-se medir a maior quantidade de grãos possível, entretanto foram medidos somente 20 grãos, pois na condição inicial os grãos possuem grandes dimensões.

O tamanho de grão obtido pelo Método do Intercepto Linear de Heyn foi de 310 ± 90 μm. O desvio-padrão das medidas foi alto, porque existe uma variação apreciável com relação ao tamanho dos grãos na amostra nesta condição. De acordo com a norma ASTM E112-96/2004 possui tamanho de grão inicial ASTM (G) igual a 0.

Segundo Collings (1980), que estudou ligas do sistema Ti-Nb, os menores valores de módulo de elasticidade se encontram nas composições aproximadas de 15 e 42% de Nb (% em peso), para amostras que foram somente solubilizadas. Os módulos de elasticidade reportados por ele são aproximadamente iguais a 95 GPa e 70 GPa para as ligas Ti-30Nb e Ti-35Nb, respectivamente, ambas na condição solubilizada.

No presente estudo, o módulo de elasticidade obtido foi igual a 69 ± 2 GPa. Comparando esse valor com o reportado por Collings (1980), verifica-se que se encontra

mais próximo do módulo de elasticidade da liga Ti-35Nb, que apresenta maior teor nióbio (elemento β-estabilizador). Este fato pode estar relacionado com a presença de Mo na liga estudada, visto que este elemento, assim como o Nb, também é um elemento β-estabilizador.

De acordo com Fanton e colaboradores (2016), que estudaram a liga Ti-30Nb-4Sn, a dureza Vickers na condição solubilizada é igual a 190 HV e segundo Hayama e colaboradores (2014), a dureza da liga Ti-35Nb também na condição solubilizada é aproximadamente 181 HV. Comparando os resultados de dureza obtidos para a liga Ti-30Nb-5Mo estudada neste trabalho, verifica-se que o valor médio de dureza obtido (182 ± 5 HV) está de acordo com outras ligas de titânio que possuem elementos β-estabilizadores e com teores de Nb próximos aos da liga estudada.

3.2 Caracterização da liga na condição encruada

Padilha e Siciliano Jr (2005), informam que durante a deformação plástica a frio a maior parte de energia utilizada é perdida sob a forma de calor. Durante o processo de laminação a frio realizada neste trabalho foi possível confirmar essa afirmação, pois conforme ocorreu o aumento do número de passes de laminação, constatou-se um crescente aquecimento do lingote.

Cerca de 2 a 10% da energia utilizada é armazenada no material sob a forma de defeitos cristalinos, como falhas de empilhamento e discordâncias, sendo que o restante da energia utilizada é perdida sob a forma de calor, como já citado (PADILHA, SICILIANO JR, 2005). Os defeitos introduzidos durante a deformação plástica a frio aumentam a energia livre do material, fornecendo o potencial termodinâmico para a recuperação e a recristalização quando o metal é recozido posteriormente (HUMPHREYS, HATHERLY, 2004; SANTOS, 2006).

Os elementos de liga, Nb e Mo, são β-estabilizadores e contribuíram para a estabilização da fase β, o que garantiu uma maior ductilidade da liga, sendo possível alcançar uma deformação plástica a frio de 86% de redução em espessura. Esta redução foi obtida mediante sucessivos passes de laminação sem recozimento intermediário.

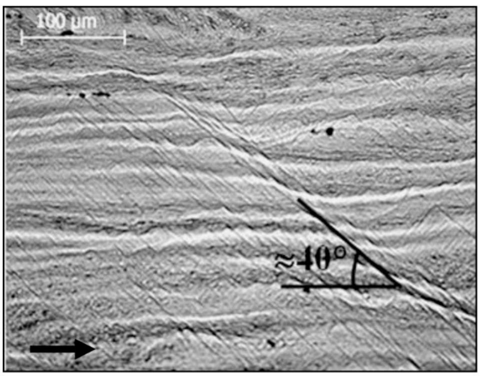
De acordo com Padilha e Siciliano Jr (2005), durante o processo de laminação os grãos do material, que são inicialmente equiaxiais (possuem praticamente o mesmo tamanho em todas as direções), tornam-se alongados e achatados em relação à direção de laminação.

A micrografia da liga Ti-30Nb-5Mo deformada por laminação a frio é apresentada na Figura 3, onde é possível observar que os grãos que eram inicialmente equiaxiais, tornaram-se alongados e compactados após o processo de laminação, sendo difícil de identificar os contornos de grãos individuais e a presença da fase α".

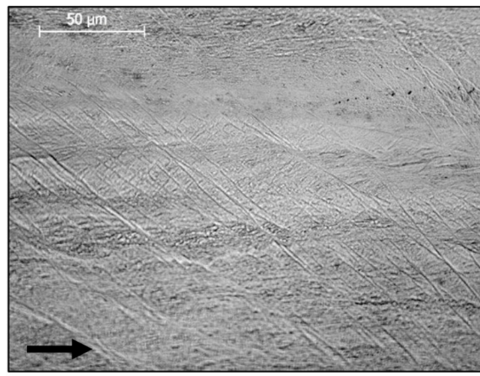
Verifica-se ainda na Figura 3a, a presença de heterogeneidades de deformação, chamadas bandas de cisalhamento, com inclinação aproximada de 40º em relação à direção

horizontal. De acordo com Humphreys e Hatherly (2004), as bandas de cisalhamentos tendem a ocorrer em materiais altamente deformados, elas são independentes da estrutura dos grãos, mas dependentes do modo e da quantidade de deformação. Padilha e Siciliano Jr (2005), afirmam que as bandas de cisalhamentos formam ângulo de aproximadamente 30 a 60º em relação à direção de deformação, apresentando também outra característica importante, como o fato de não se limitarem a um determinado grão, dessa forma, atravessa vários grãos.

A Figura 3b apresenta uma micrografia onde pode-se verificar a presença de várias bandas de cisalhamento.



(a)



(b)

Figura 3: Microestrutura da liga Ti-30Nb-5Mo deformada por laminação a frio até 86%: (a) Em destaque as bandas de cisalhamento que fazem ângulo aproximado de 40° com a horizontal, (b) Região apresentando várias bandas de cisalhamento. A seta indica a direção de laminação.

Fonte: Os Autores.

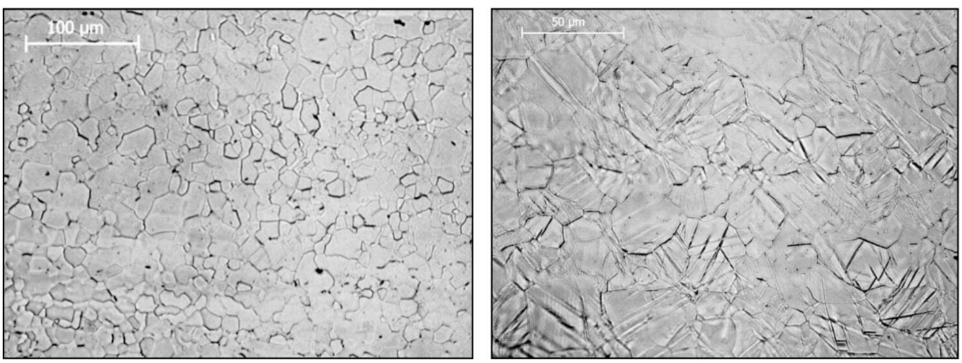
Verificou-se um aumento no valor de dureza Vickers em relação ao material na condição inicial, sendo igual a 239 ± 4 HV. Este fenômeno pode ser explicado durante o processo de deformação plástica a frio de um material metálico, visto que parte da energia mecânica utilizada é convertida em calor e parte é armazenada no material sob a forma de defeitos cristalinos, principalmente discordâncias (HUMPHREYS, HATHERLY, 2004). Com o aumento da densidade de discordâncias no material, há o aumento da resistência mecânica e da maior dureza, e diminuição da ductilidade (PADILHA, SICILIANO JR, 2005).

Verificou-se também um aumento no módulo de elasticidade na amostra na condição encruada (79 ± 4 GPa), quando comparado com o material na condição inicial (69 ± 2 GPa). Este fato pode estar relacionado com a fase α”, pois na condição inicial há a presença desta fase, mas em menor quantidade do que nas amostras deformadas. A martensita α” pode ser formada por meio do resfriamento rápido e também ser induzida por deformação plástica e desta forma, durante a laminação a frio há um aumento da fração volumétrica desta fase,

o que contribuiu para o aumento dos valores de módulo de elasticidade. De acordo com Zhan, Chunliu e Wenping (2012), o módulo de elasticidade é afetado principalmente pela composição química e pela microestrutura da liga. Além do aumento da densidade dos defeitos cristalinos, há em alguns sistemas a formação de novas fases, estas fases são induzidas por deformação e geralmente denominadas martensitas (PADILHA, SICILIANO JR, 2005), como é o caso aqui apresentado.

3.3 Caracterização da liga na condição recozida

A amostra da liga Ti-30Nb-5Mo que foi submetida ao tratamento térmico de recozimento a 700°C por 60 min, encontra-se totalmente recristalizadas, sendo a microestrutura apresentada na Figura 4. Verifica-se ainda que na Figura 4a há a presença somente da fase β, e na Figura 4b há uma combinação da fase β com a fase α”.



(a) (b)

Figura 4: Microestrutura de amostras da liga Ti-30Nb-5Mo recozida a 700ºC/60 min: (a) Apresentando grãos com a presença somente da fase β; (b) Apresentando grãos com a fase β combinada com a fase α”.

Fonte: Os Autores.

O tamanho médio do grão da amostra recozida foi obtido de acordo com o Método do Intercepto Linear de Heyn, conforme norma ASTM E112-96/2004, como já citado. O tamanho de grão obtido foi de 12 ± 2 µm, sendo classificado com tamanho de grão ASTM (G) entre 9.5 e 10.0. Mediante este resultado, verificou-se que ocorreu uma diminuição considerável de tamanho de grão em relação a amostra inicial (solubilizada), sendo que nesta condição o tamanho de grão era de 310 ± 90 μm.

Em relação aos valores de dureza Vickers, nota-se que a dureza da amostra nesta condição (199 ± 5 HV) é inferior ao valor obtido na amostra deformada (239 ± 4 HV), pois a amostra recozida encontrava-se totalmente recristalizada. De acordo com Humphreys e Hatherly (2004) e Santos (2006), no processo de recristalização há restauração total das propriedades mecânicas do material metálico aos valores antes da deformação ocorrer,

pois ocorre aniquilação de grande quantidade de defeitos cristalinos, principalmente discordâncias, devido ao surgimento de uma nova estrutura de grãos com baixa densidade de defeitos.

Vale ressaltar que a dureza na condição recozida é ligeiramente superior do que a dureza na condição inicial, isso pode ser explicado pelo tamanho dos grãos do material recozido, visto que nesta condição eles são menores, deste modo, a sua dureza quando comparada com a das amostras solubilizadas (182 ± 5 HV) é superior. De acordo com Callister Jr (2013), um material com granulação mais fina possui maior área total de contornos de grão, o que dificulta o movimento das discordâncias, aumentando a sua resistência mecânica. Desta forma, ocorreu diminuição da dureza do material recozido em relação à condição deformada, chegando próximo ao valor obtido na condição inicial, mas não o igualando.

O valor de módulo de elasticidade da amostra recozida (74 ± 7 GPa), não apresentou variação significativa, quando considerado o desvio padrão das medidas, em relação ao módulo de elasticidade da amostra deformada (79 ± 4 GPa).

3.4 Caracterização da liga na condição recozida e em seguida envelhecida

Após o tratamento térmico de recozimento a 700ºC/60min, as amostras da liga Ti-30Nb-5Mo foram envelhecidas a 260ºC em tempos iguais de 1, 15, 30, 60 e 120 min.

O objetivo de realizar o tratamento térmico de envelhecimento nas amostras recozidas é para avaliar as mudanças que ocorrem no comportamento da liga estudada em relação às suas propriedades, como dureza e módulo de elasticidade, que acontecem durante o tratamento térmico de envelhecimento, visto que há a precipitação de fases metaestáveis que alteram os valores de módulo de elasticidade e dureza do material. Vale ressaltar que, segundo Zhou, Niinomi e Akahori (2004), um tratamento de envelhecimento adequado pode resultar em melhora do balanço entre baixo módulo de elasticidade e elevada resistência mecânica.

A Figura 5 apresenta as micrografias obtidas para a liga estudada que foram recozidas a 700ºC/60min e em seguida envelhecidas a 260ºC em tempos variáveis.

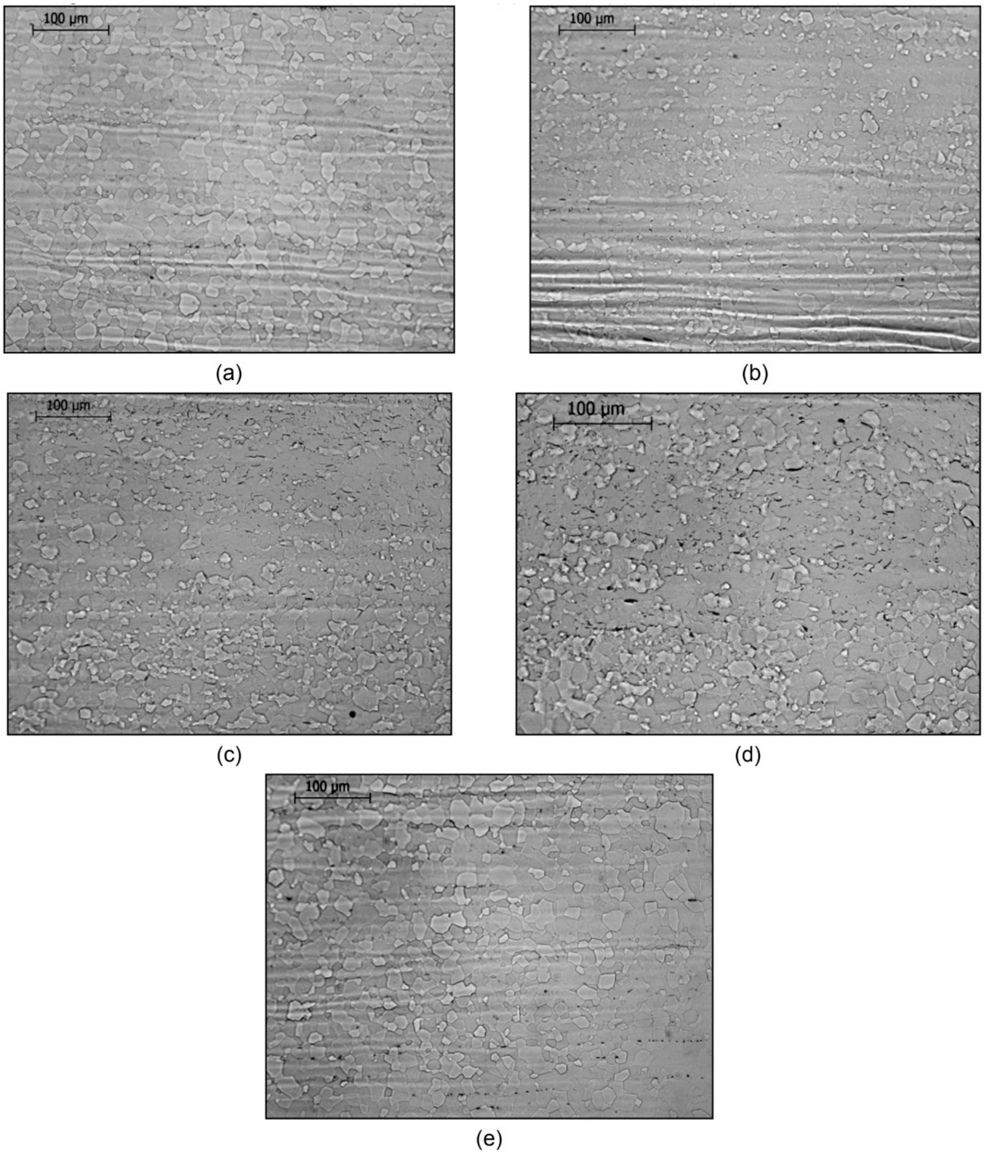


Figura 5: Microestrutura das amostras da liga Ti-30Nb-5Mo recozidas a 700°C/60min e em seguida envelhecidas a 260°C por: (a) 1 min; (b) 15 min; (c) 30min; (d) 60 min e (e) 120 min.

Fonte: Os Autores.

Comparando as micrografias obtidas para as amostras envelhecidas, verifica-se que não houve variação significativa com relação ao tamanho de grão da amostra recozida. Deste modo, as temperaturas de envelhecimento utilizadas não foram suficientemente altas para que ocorresse o crescimento dos grãos recristalizados.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos das medidas de dureza Vickers e de módulo de elasticidade pelo método ultrassônico. Comparando os resultados de dureza

Vickers, referentes às amostras recozidas e em seguida envelhecidas, notou-se um aumento em tais valores, sendo este fato mais pronunciado nos maiores tempos de envelhecimento, este comportamento está relacionado às fases que se precipitaram durante o tratamento térmico de envelhecimento.

Com relação ao módulo de elasticidade, observa-se que ocorreu um aumento quando comparado com os valores obtidos para a amostra na condição recozida (74 ± 7 GPa), estando este fato relacionado com as fases que se precipitam na microestrutura do material durante o tratamento térmico de envelhecimento. Lopes (2010), em seu estudo também verificou um aumento nos valores de módulo de elasticidade e de dureza Vickers para as ligas Ti-30Nb e Ti-35Nb. De acordo com Lopes, esse aumento ocorreu devido a presença das fases ω e α, que precipitaram durante o envelhecimento e apresentam maiores valores de módulo de elasticidade e de dureza do que as fases β e α".

Tempo (min)	**Amostras envelhecidas a 260°C**	
	Módulo de Elasticidade (GPa)	**Dureza Vickers (HV)**
1	80 ± 1	239 ± 9
15	92 ± 1	225 ± 19
30	93 ± 1	223 ± 4
60	91 ± 2	289 ± 13
120	96 ± 1	281 ± 9

Tabela 1: Módulo de elasticidade e dureza Vickers (HV) obtidos para a liga Ti-30Nb-5Mo envelhecida a 260°C.

Fonte: Os Autores.

4 I CONCLUSÃO

Os teores dos elementos b-estabilizadores, nióbio e molibdênio, contribuíram para a estabilização da fase β, o que resultou em grande ductilidade do material, sendo possível a deformação plástica a frio até a redução em espessura igual a 86%.

Após a laminação a frio os grãos do material encontram-se alinhados na direção de laminação e também há a presença de heterogeneidades de deformação, como bandas de cisalhamento. Na condição deformada verificou-se um aumento nos valores de dureza, este fato está relacionado ao acúmulo de defeitos, principalmente discordâncias, que ocorrem durante o processo de deformação plástica a frio. O módulo de elasticidade do material encruado aumentou quando comparado com a condição inicial, este fato pode estar relacionado com o aumento da fração volumétrica da fase α" resultante da transformação martensítica induzida por deformação, visto que esta fase apresenta módulo de elasticidade maior do que a fase β.

A amostra recozida encontra-se totalmente recristalizada. Os valores de dureza e

de módulo de elasticidade nesta condição não apresentaram variação significativa, quando considerado o desvio-padrão das medidas, em relação ao módulo de elasticidade da amostra encruada. Já os valores de dureza Vickers foram inferiores aos do material na condição encruada, o que era esperado, pois durante o processo de recristalização são eliminadas grandes quantidades de defeitos cristalinos, o que acarreta na diminuição da dureza do material.

Na condição envelhecida verificou-se uma variação no módulo de elasticidade e na dureza Vickers, que está relacionada com a precipitação de diferentes fases durante o tratamento térmico de envelhecimento. De um modo geral, as amostras recozidas e em seguida envelhecidas apresentaram microestrutura semelhante às das amostras somente recozidas. Foram obtidos maiores valores de módulo de elasticidade e de dureza Vickers nas amostras envelhecidas em relação às amostras recozidas. Este comportamento pode estar relacionado com as fases ω e α que precipitam no material durante o tratamento térmico de envelhecimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo apoio financeiro; à Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) pelo nióbio e ao Prof. Dr. Rubens Caram Junior da Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas (FEM – UNICAMP) pela disponibilização do forno de fusão a arco elétrico.

REFERÊNCIAS

ANKEM, S.; GREENE, C. A. **Recent developments in microstructure/property relationships of beta titanium alloys**. Materials Science and Engineering A 263, p. 127-131, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E112-96/2004. **Standart Test Method For Determining Average Grain Siz**e. West Conshohocken, PA, 2004.

BANERJEE, R.; NAG, S.; FRASER, H. L. **A novel combinatorial approach to the development of beta titanium alloys for orthopedic implants**. Materials Science & Engineering 25, p. 282-289, 2005.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 817p., 2013.

COLLINGS, E. W. **The metal physics of titanium alloys**. In: Proceedings of the 4th International Conference on Titanium. Columbus, OH: Battelle Memorial Institute, p. 77-91, 1980.

EISENBARTH, E.; VELTEN, D.; MÜLLER, M.; THULL, R.; BREME, J. **Biocompatibility of b-stabilizing elements of titanium alloys.** Biomaterials 2. p. 5 5705-5713, 2004.

FANTON, L.; LIMA, N. B., HAYAMA, A. O. F.; CARAM, R.; FOGAGNOLO, J. B. **Texture development in cold deformed and recrystallized Ti-30Nb-4Sn alloy and its effects on hardness and Young's modulus**. Advanced Engineering Materials, 2016.

HAYAMA, A. O. F.; LOPES, J. F. S C.; SILVA, M. J. G.; ABREU, H. G.; CARAM, R. **Crystallographic texture evolution in Ti-35Nb alloy deformed by cold Rolling**. Materials and Design 60, p.653-660, 2014.

HUMPHREYS, F. J.; HATHERLY, M. **Recrystallization and related annealing phenomena**. 2nd ed., Elsevier, 2004.

LOPES, J. F. S. C. **Avaliação de Processos de Deformação Plástica, Recristalização e Envelhecimento de Ligas Ti-Nb**. Dissertação de Mestrado, 112 p., 2010. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NIINOMI, M. **Mechanical properties of biomedical titanium alloys**. Materials Science and Engineering A 243, p. 231-236, 1998.

NIINOMI, M.; HATTORI, T.; NIWA, S. **Material Characteristics and biocompatibility of Low Ridigity Titanium Alloys for Biomedical Applications**. Biomaterial in Ortophedics, Ed. Marcel Dekker, 2004.

PADILHA, A. F.; SICILIANO JR, F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2ª ed., São Paulo, 2005.

SILVA, H. M.; SCHNEIDER, S. G.; MOURA NETO, C. **Study of nontoxic aluminum and vanadium-free titanium alloys for biomedical applications**. Materials Science and Engineering C 24, p. 679-682, 2004.

SANTOS, D. R. **Obtenção da liga Ti-35Nb por metalurgia do pó para utilização em próteses ortopédicas**. 2006. 155 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

TAMIRISAKANDALA, S.; VEDAM, B. V.; BHAT, R. B. **Recent advances in the deformation processing of titanium alloys**. Journal of Materials Engineering and Performance 12, p. 661-673, 2003.

TANE, M.; AKITA, S.; NAKANO, T.; HAGIHARA, K, UMAKOSHI, Y.; NIINOMI, M.; NAKAJIMA, H. **Peculiar elástica behavior of Ti-Nb-Ta-Zr single crystals**. Acta Materialia 56, p. 2856-2863, 2008.

TARR, R. R.; CLARKE, I. C.; GRUEN, T. A.; SARMENTO, A. **Comparison of loading behavior of femoral stems of Ti-6Al-4V and cobalt-chromium alloys: A Three-Dimensional Finite Element Analysis**. Titanium Alloys in Surgical Implants, ASTM STP 796, H.A. Luckey and Fred Kubli Jr., Eds., American Society of Testing Materials, p. 88-101, 1983.

XU, L.; XIAO, S.; TIAN, J.; CHEN, Y. **Microstructure, mechanical properties and dry wear resistance of** β-type **Ti–15Mo–xNb alloys for biomedical applications.** Trans. Nonferrous Met. Soc. China 23, p. 692–698, 2012.

ZHAN, Y.; CHUNLIU, L.; WENPING, J. **β-Type Ti–Mo–Si ternary alloys designed for biomedical applications.** Materials and Design 34, p. 479–482, 2012.

ZHOU, Y. L.; NIINOMI, M.; AKAHORI, T. **Decomposition of martensite α" during aging treatments and resultingmechanical properties of Ti–Ta alloys.** Materials Science and Engineering A 384, p. 92–101, 2004.

CAPÍTULO 4

INVESTIGATION ON THE MECHANICAL PROPERTY BEHAVIOUR OF THE HYBRID COMPOSITES FROM NATURAL AMAZONIAN FIBRES BY NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHOD

Data de submissão: 09/12/2022 *Data de aceite: 02/01/2023*

Gilberto García del Pino
Department of Mechanical Engineering, State University of Amazonas, Manaus, AM, Brazil
0000-0003-0754-2390

Abderrezak Bezazi
Laboratoire de MécaniqueAppliquéedes Nouveaux Matériaux (LMANM), Université 8 Mai 1945, Guelma, Algeria
0000-0002-4461-6689

Haithem Boumediri
Laboratoire de MécaniqueAppliquéedes Nouveaux Matériaux (LMANM), Université 8 Mai 1945, Guelma, Algeria
0000-0002-9578-0948

José Luis Valin Rivera
Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Quilpué 2430000, Chile
0000-0002-9751-220X

Antonio Claudio Kieling
Department of Mechanical Engineering, State University of Amazonas, Manaus, AM, Brazil
0000-0002-0552-954X

Sofia Dehaini Garcia
Department of Mechanical Engineering, State University of Amazonas, Manaus, AM, Brazil
0000-0002-8316-0012

José Costa de Macedo Neto
Department of Materials Engineering State University of Amazonas, Manaus, AM, Brazil
0000-0003-1155-0027

Marcos Dantas dos Santos
Department of Mechanical Engineering, State University of Amazonas, Manaus, AM, Brazil
0000-0002-4356-491X

Tulio Hallak Panzera
Department of Mechanical Engineering, Federal University of Sao Joao del Rei, UFSJ, Sao Joao del Rei, Brazil
0000-0001-7091-456X

César Alberto Chagoyen Méndez
Faculty of Mechanical Engineering, Central University “Marta Abreu” of Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba
0000-0002-9377-3234

ABSTRACT: The application of lignocellulosic fibers as reinforcements in composite materials has found increasing use in recent years, due to the attractive characteristics of natural fibers such as their low cost, high specific modulus, biodegradable, abundant and with many technical qualities. Natural fiber hybrid composites are very frequently used in the automotive industry. In this work, a computational and experimental analysis is carried out with the objective of comparing curauá fibers, jute and sisal fibers used in epoxy resin matrix composites for use in industry, determining the most appropriate hybridization effect by establishing the proportions and amounts of each fiber in a hybrid composite with better mechanical properties. To carry out the research, the Finite Element Method was first used, performing several models with different amounts of fibers which were later validated with mechanical tests. The number of Finite Element models and specimens performed was determined through the design of experiments using the Taguchi Method. As a result of the work, a greater strength of the hybrid composites made with greater amount of curauá fiber (20%), jute (10%) and lesser of Sisal fiber (5%) was obtained, both in the results obtained by the Finite Element Method and in the mechanical tests.
KEYWORDS: Hybrid composites, finite element method, natural fibres, mechanical testing.

INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRAS NATURAIS AMAZÔNICAS POR MÉTODOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

RESUMO: A aplicação de fibras lignocelulósicas como reforço em materiais compósitos tem encontrado uso crescente nos últimos anos devido às características atrativas das fibras naturais como: seu baixo custo, alto módulo específico, biodegradável, abundante e com muitas qualidades técnicas. Compósitos híbridos de fibras naturais são muito usados na indústria automotiva. Neste trabalho é realizada uma análise computacional e experimental com o objetivo de comparar as fibras de curauá, juta e sisal utilizadas em compósitos com matriz de resina epóxi para uso na indústria, determinando o efeito de hibridação mais adequado, estabelecendo as proporções e quantidades de cada fibra em um compósito híbrido com melhores propriedades mecânicas. Para realizar a pesquisa, primeiramente foi utilizado o Método dos Elementos Finitos, realizando diversos modelos com diferentes quantidades de fibras que posteriormente foram validados com ensaios mecânicos. O número de modelos de Elementos Finitos e espécimes realizados foi determinado através do planejamento de experimentos usando o Método Taguchi. Como resultado do trabalho, obteve-se maior resistência dos compósitos híbridos confeccionados com maior quantidade de fibra de curauá (20%), juta (10%) e menor de fibra de sisal (5%), em ambos resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos e nos ensaios mecânicos.
PALAVRAS-CHAVE: Compósitos híbridos, método dos elementos finitos, fibras naturais, ensaios mecânicos.

1 I INTRODUCTION

The application of lignocellulosic fibres as reinforcements in composite materials has found increasing use in recent years to replace synthetic fibres such as glass, carbon and

aramid fibres due to the characteristics of natural fibres such as their low cost, low density, high specific modulus, economic and environmental advantages, biodegradable, abundant and with many technical qualities [Pickering et al. 2016, Khelifa et al 2021, Ramesh et al 2017]. Many researchers and various industries have invested in biocomposites for many applications using local natural fibres such as Agave (Agave americana), Sisal (Agave sisalana Perrine ex Engelm), coconut (Cocos nucifera), jute (Corchorus capsularis), flax (Linum usitatissimum), curaua (Ananas Erectifolius), etc. as substitutes for synthetic fibers [Zanichelli et al. 2018, Bezazi et al. 2020, Garcia del Pino et al 2020. It is known that the mechanical performance of a composite material is strongly depends on the nature, orientation of the fibres, the nature of the matrix and also on the quality of adhesion between the two components [Bezazi et al. 2020]. In order to improve the adhesion of the fibre and reduce the water absorption, the surface of the fibre can be modified by physical or chemical methods [Garcia del Pino et al 2021]. Due to this, in this work, fibers treated with 5% by weight sodium hydroxide solutions with an immersion time of 4 hours were used, according to previous research recommendations [Garcia del Pino et al 2021].

In this work was used Epoxy Resin as a matrix, which is a thermosetting system widely used in the industry due to their low cost and adaptability to be transformed into large composite structures [Garcia del Pino et al 2021]. A computational and experimental analysis is carried out with the objective of comparing curauá fibers, jute and sisal fibers used in epoxy resin matrix composites for use in industry, determining the most appropriate hybridization effect by establishing the proportions and amounts of each fiber in a hybrid composite with better mechanical properties. The number of Finite Element models and specimens performed was determined through the design of experiments using the Taguchi Method and the results were statistically validated, which results corresponded with other works done and published previously.

2 | METHODOLOGY

The vegetable fibers used in this work were obtained in Santarem, in the State of Pará (Northern Brazil, Amazon region). The matrix of the composite material was the epoxy resin (bisphenol-epichlorhydrin) with a density of 1.16 g/cm^3 and the epoxy hardener (3154, benzyl alcohol) with a density of 1.005 g/cm^3 supplied by Redelease company in São Paulo, Brazil. First, the design of the experiment was carried out using the Taguchi Method and the MINITAB 18 software using an L25 matrix with 3 factors and 5 levels as can be seen in Table 1. Following the Taguchi Matrix, a study was carried out using the Finite Element Method (FEM) through Solidworks software code. The FEM has been used in different areas of Engineering, including the evaluation of composite materials with plant fibers [Parashar et al. 2021, Silvaet al. 2012, Rajeshet al. 2016]. The dimensions of the models for both the pure resin and the composite with fibers correspond with the dimensions of the standard for

the tensile force D638–14 Type I, as can be seen in Figure 1a [ASTM. 2014]. The contact (bonded) between the fibers and the resin of the specimen was ensured to guarantee the transmission of loads, simulating a correct bonding between the fibers and the matrix. To simulate the tensile test on one of the specimen heads, on both flat faces, fixed-type restrictions were placed, and at the other end, a force of 1150 N was applied in the area corresponding to the faces of the head of the test body as can be seen in figure 1b.

Type of fibre	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
A: Curauá Fibre weight fraction (wt.%)	0	5	10	15	20
B: Sisal Fibre weight fraction (wt.%)	0	5	10	15	20
C: Jute Fibre weight fraction (wt.%)	0	5	10	15	20

Table 1. L25 Taguchi with 5 levels 0 5 10 15 20

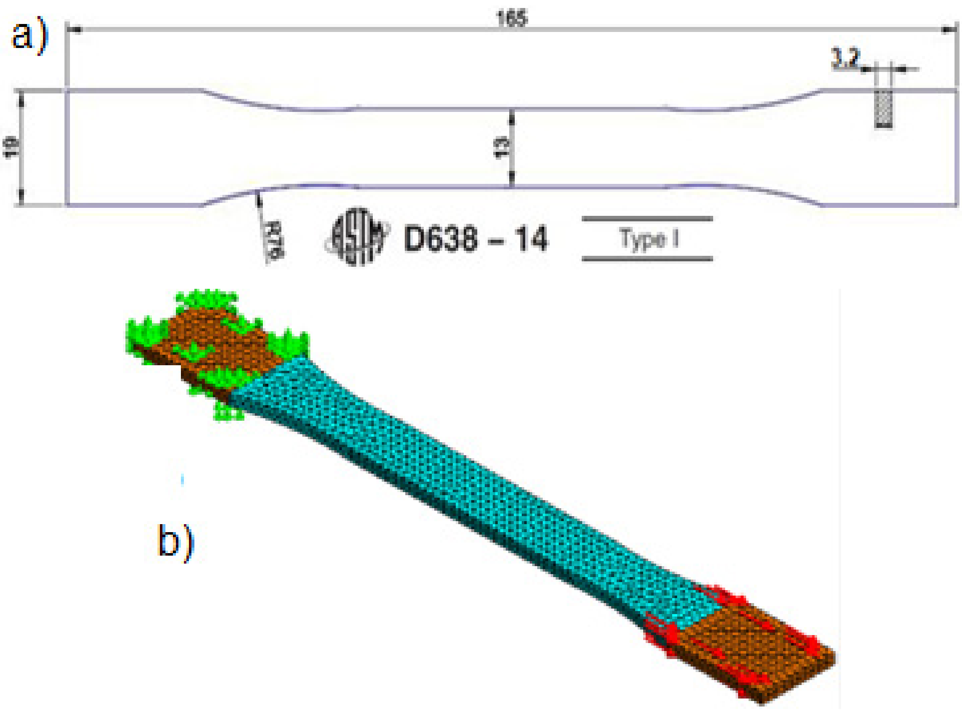


Fig. 1: Finite Element Model: a) Dimensions, b) Model with the mesh, loads and constraints.

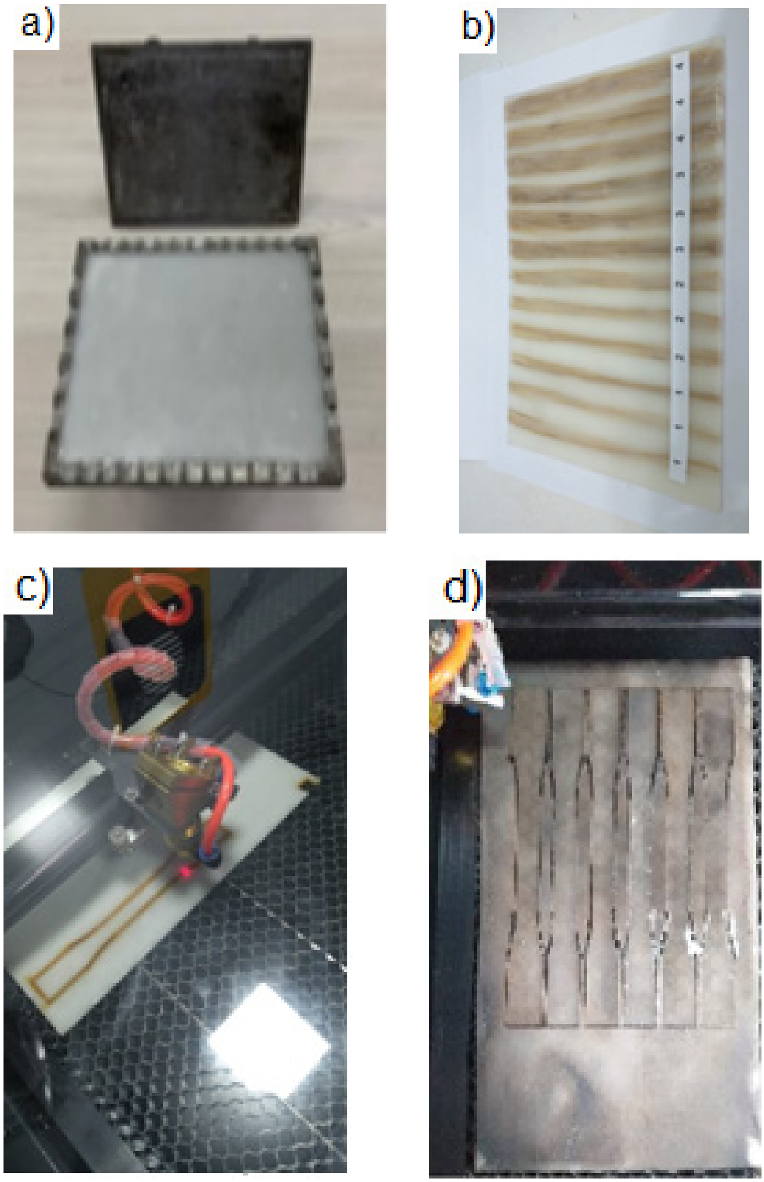


Fig. 2: Manufacture of specimens: a) and b) molded composite plate, c) and d) cutting of specimens in a laser machine,



Fig. 3: Tensile test

3 I RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 2 shows the results obtained in all models analyzed by the Finite Element Method and the tensile tests for all specimens according to the Taguchi matrix. From the results of the tensile tests, it can be seen that when increasing the fiber content up to 35 %wt., increases the tensile stress, noting a greater increase with the increment of curauá fiber. Figure 4 shows several sections of specimens 1, 2, 14, 15, 24 and 25 modeled by FEM according to the Taguchi Matrix before processing (a) and after processing (b). The amount of fiber in each model corresponds to % by weight. It can be seen in model 2b, that the Sisal and jute fibers are equally loaded (sample 2) and when introducing curauá fibers they absorb much more loads because they are more resistant (sample15, figure 15b).

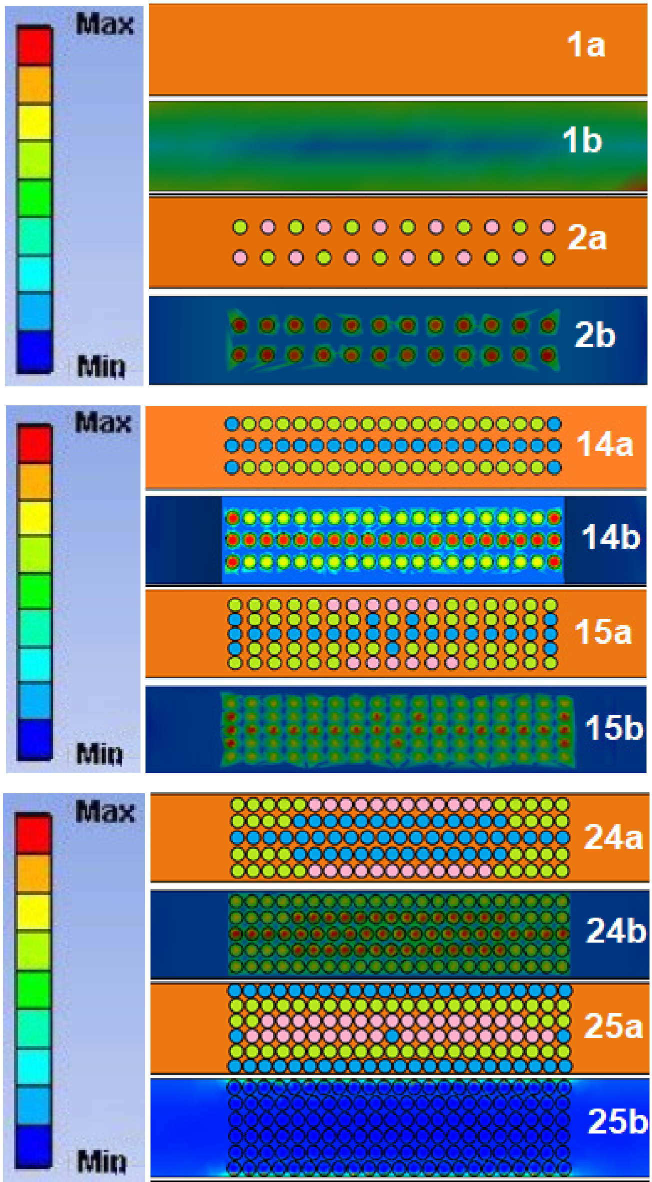


Fig. 4: Finite Element Model of 6 tests bodies (1, 2, 14, 15,24, 25)

The experimental data is transformed into a signal to noise ratio (S/N) to determine the optimal parameter configuration to maximize tensile properties. As Taguchi's analysis aims to maximize the tensile strength, the S/N ratio criterion chosen is the larger is better (LBT) [Garcia del Pino et al 2021]. For the analysis of the results, ANOVA for tensile strength was used and the regression equation (Equation 1) was determined. The standardized effect of the factors is examined by preparing a Pareto chart (Figure 5), which depicts the most influential factor in the response. The analysis suggests that the curauá fibre amount

is the most effective factor, significantly contributing to the tensile strength.

Regression Equation

Tensile Strength =

35,70 + 9,18 A + 8,40 B + 4,01 C - 0,2046 A*A - 0,2023 B*B - 0,2594 C*C - 0,3977 A*B - 0,0389 A*C…………………………………………………………....(1)

Test Body	A (wt.%)	B (wt.%)	C (wt.%)	von Mises (FEM), (MPa)	Elongation (FEM) (%)	Tensile strength (MPa)	Signal to Noise Ratios
1	0	0	0	39.7	0.82	36±0.94	-
2	0	5	5	143.3	0.78	92±0.67	39,83
3	0	10	10	101.5	0.66	102±0.67	41,54
4	0	15	15	77.99	0.72	125 ±0.66	39,91
5	0	20	20	66.06	0.98	98±0.67	40,76
6	5	0	5	176.3	0.76	97±0.67	38,63
7	5	5	10	118.9	0.67	104±0.67	40,79
8	5	10	15	96.61	0.71	127 ±0.66	41,46
9	5	15	20	84.29	1.24	98±0.67	41,17
10	5	20	0	105.5	0.65	121 ±0.66	39,83
11	10	0	10	121.6	0.64	106±0.67	38,47
12	10	5	15	96.51	0.7	128 ±0.66	40,73
13	10	10	20	72.54	1.18	98±0.67	41,40
14	10	15	0	105.3	0.654	124 ±0.66	41,22
15	10	20	5	89.53	1.27	136±0.84	40,05
16	15	0	15	91.64	0.69	125 ±0.66	38,63
17	15	5	20	80.35	1.07	98±0.67	40,79
18	15	10	0	102.1	0.64	128 ±0.66	41,46
19	15	15	5	85.80	0.73	140±0.84	41,17
20	15	20	10	74.16	1.28	92±0.67	39,83
21	20	0	20	77.80	1.02	98±0.67	38,47
22	20	5	0	95.63	0.61	131 ±0.66	40,73
23	20	10	5	83.87	1.27	143±0.84	41,40
24	20	15	10	71.34	1.27	92±0.67	41,22
25	20	20	15	116.0	1.45	61±0.55	40,05

Table 2 Results analyzed by the Finite Element Method and the tensile tests

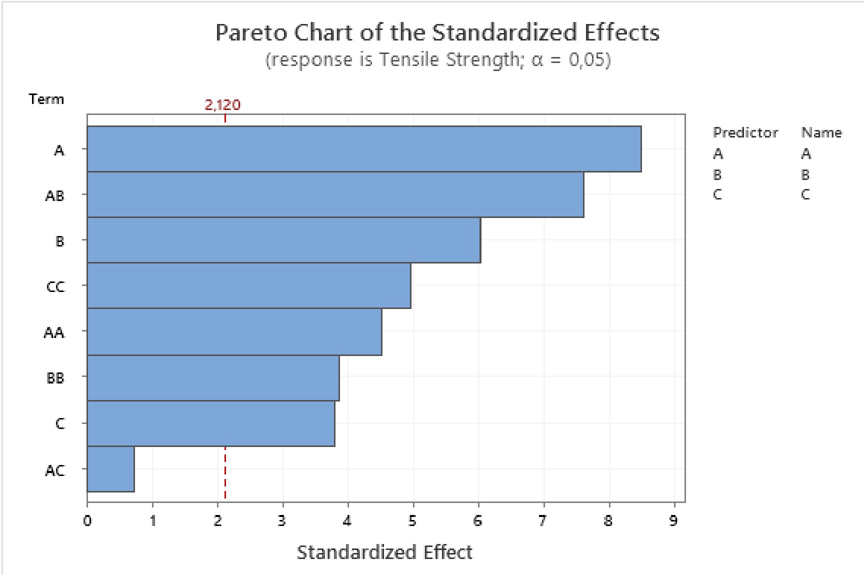


Fig. 5: Pareto chart of the standardized effects

4 I CONCLUSIONS

Through the results of the computational part of the work, it can be seen that when increasing the amount of fiber, the von Misses stresses and deformations decrease, which improves the tensile strength of the specimens, which is verified in the results of the tensile tests. In the experimental part, it was found that when increasing the amount of fibers, the tensile effort increased up to an amount of vegetable fiber equal to 35 %Wt, the greatest increase being when placing curauá fibers.

REFERENCES

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D638-14: Standard test method for tensile properties of plastics**. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

Bezazi A. et al. **Alkali treatment effect on physicochemical and tensile properties of date palm rachis fibers**. Journal of Natural Fibers 2020. doi.org/10.1080/15440478.2020.1848726.

Garcia del Pino G. et al. **Hybrid polyester composites reinforced with curauá fibres and nanoclays**, Fibers and Polymers. v 21, 2020. doi.org/10.1007/s12221-020-9506-7.

Garcia del Pino G. et al. **Optimal tensile properties of biocomposites made of treated Amazonian curauá fibres using Taguchi Method**. Materials Research, v.24, 2021. doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0326

Khelifa H. et al. **Mechanical characterization of mortar reinforced by date palm mesh fibers: Experimental and statistical analysis**. Construction and Building Materials, v.300, 2021. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124067.

Parashar, S.; CHAWLA, V. K. **Evaluation of fiber volume fraction of kenaf-coir-epoxy based green composite by finite element analysis**. Materials Today: Proceedings. V.50, 2021, doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.147.

Pickering K.L et al. **A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance**. Composites: Part A, v.83, 2016, doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038.

Rajesh, M. et al. **Finite element analysis of coir / Banana fiber reinforced composite material**., Int. J. Adv. Res. Mech. Eng. Technol. V (4), 2016.

Ramesh M., Palanikumar K., Reddy K.H. **Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials**. Renew. Sustain. Energy Rev., v. 79, 2017. doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.094.

Silva, J. L.; et al. **Numerical and experimental analyses of biocomposites reinforced with natural Fibres,** Int. J. Mater. Eng. V.2, 2012. doi.org/10.5923/j.ijme.20120204.03.

Zanichelli A. et al. **Contribution of date-palm fibres reinforcement to mortar fracture toughness**. Procedia Struct. Integrity, v. 13, 2018. doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.089.

APRENDIZADO DE MÁQUINA EMPREGADO EM SOLUÇÕES APLICADAS EM UM BRAÇO MANIPULADOR DIDÁTICO

Data de aceite: 02/01/2023

Márcio Mendonça
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/5415046018018708

Angelo Feracin Neto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/0580089660443472

Ricardo Breganon
Instituto Federal do Paraná, Campus Jacarezinho
Jacarezinho – PR
http://lattes.cnpq.br/2441043775335349

Rogério Breganon
Instituto Federal do Paraná, Campus Campo Largo
Campo Largo – PR
http://lattes.cnpq.br/1963387673440898

Emerson Ravazzi Pires da Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/0797649979829091

Vicente de Lima Gongora
Faculdade da Industria Senai
Londrina - PR
http://lattes.cnpq.br/6784595388183195

Michelle Eliza Casagrande Rocha
Universidade Norte do Paraná
Londrina - PR
http://lattes.cnpq.br/4411484670091641

Andre Luis Shiguemoto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/9243656534211182

Celso Alves Correa
Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica (Damec)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/8547137298279961

Matheus Gil Bovolenta
Acadêmico - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1518815195539638

Rodrigo Rodrigues Sumar
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia
Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1461760661483683

Luiz Francisco Sanches Buzachero
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia
Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1747856636744006

Márcio Jacometti
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Ciências
Humanas e Sociais
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/8509336134084374

Kazuyochi Ota Junior
Mestrando - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica (PPGEM)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/3845751794448092

RESUMO: Braços manipuladores robóticos tem uma abrangente possibilidade de aplicações tais quais em indústrias, como manipulação e classificação de peças viagens espaciais e até mesmo cirurgias a distância. Seu emprego para deslocamento de objetos de um ponto ao outro é simples, mas quando se deseja manipular objetos específicos de um determinado conjunto, a tarefa se torna muito complexa. Buscando a solução para este problema, a visão computacional serve na identificação de um objeto cuja a sua coordenada é traduzida pelo baço como uma solução de sua cinemática inversa. Este trabalho propõe o desenvolvimento de Redes Neurais Artificiais para exercer as duas tarefas essenciais simultâneas de calibração de câmera e solução da cinemática inversa. Foram estudadas topologias de três configurações de Redes Neurais Artificiais com 1, 2 e 3 camadas com o objetivo de encontrar um número de neurônios por camada com menor erro. Os resultados mostraram que o Redes Neurais Artificiais de 3 camadas apresentou menor erro com a quantidade de neurônios validada. Trabalhos futuros abordarão esta configuração para casos tridimensionais e o planejamento de trajetória.
PALAVRAS-CHAVE: Redes Neurais Artificiais, Cinemática Inversa, Visão Computacional.

MACHINE LEARNING APPLIED IN SOLUTIONS APPLIED IN A DIDACTIC MANIPULATOR ARM

ABSTRACT: Robotic manipulator arms have a wide range of applications such as in industries such as manipulation and sorting of parts, space travel and even remote surgery. Its use for moving objects from one point to another is simple, but when you want to manipulate specific objects from a given set, the task becomes very complex. Seeking the solution to this problem, computer vision serves to identify an object whose coordinate is translated by the spleen as a solution of its inverse kinematics. This work proposes the development of Artificial Neural Networks to perform the two essential simultaneous tasks of camera calibration and solution of inverse kinematics. Topologies of three configurations of Artificial Neural Networks with 1, 2 and 3 layers were studied in order to find a number of neurons per layer with the lowest error. The results showed that the 3-layer Artificial Neural Network presented the lowest error with the number of validated neurons. Future work will address this configuration for three-dimensional cases and trajectory planning.
KEYWORDS: Artificial Neural Networks, Inverse Kinematics, Computer Vision.

1 I INTRODUÇÃO

Os primeiros robôs tinham a função de substituir trabalhadores na indústria responsáveis por tarefas simples e repetitivas. Linhas de produção em série foram criadas sem a presença de humanos, possibilitando que os robôs atuassem em ordens especificas do processo industrial de maneira simples como carregar um objeto de um ponto a outro. Atualmente, os manipuladores precisam de mais flexibilidade quanto a manipulação de um objeto em diferentes coordenadas ou até reconhecer objetos específicos para agrupar em uma ordem correta (BEM-ARI; MONDADA, 2018). A visão computacional tem sido uma ferramenta útil para esse fim, possibilitando o controle da pose do braço robótico em relação a um alvo através de captura de imagem (CORKE, 2011). Câmeras digitais são empregadas na robótica pelo fato de proverem mais informações que simplesmente distância ou arco de trajetória em direção a um objeto (BEM-ARI; MONDADA, 2018).

Alguns trabalhos abordam de formas diferentes a mesma situação da visão computacional com a cinemática inversa. Os autores Mishra e Meruvia (2014) propõem definir o movimento do braço robótico através de uma câmera de profundidade apta para capturar o input do usuário e a cinemática inversa do manipulador. Se comparada a outros métodos, essa técnica é mais simples e eficiente no processo de aprendizagem, tornando assim o processo mais intuitivo.

Já Mussabayev (2015) utiliza um algoritmo que identifica um objeto em um plano 2D e resolve o problema da cinemática inversa por meio do método iterativo de jacobiana inversa. O resultado foi, então, enviado a um Arduino microcontrolador que foi responsável por rotacionar servo motores dos cotovelos do braço robótico.

Uma aproximação da cinemática inversa é abordada por Zou et. al (2006) com a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) Feedforward. A velocidade de cada servo

motor e o tempo de trajetória de um ponto inicial até um ponto final são estimadas pela câmera infravermelha do console Nintendo Wii. Os experimentos mostraram sucesso ao fazer o braço robótico viajar por uma trajetória estabelecida.

Uma abordagem da visão computacional combinada com o problema de múltiplas soluções não foi encontrada com aplicação em RNAs. Por isso o objetivo desse artigo consiste em desenvolver um método para solucionar o problema da cinemática inversa e a calibração de câmera através de uma única RNA. A simplificação de ambas as tarefas possibilita o cálculo de posição do manipulador no espaço e economia de cálculo computacional. Essa aplicação foi proposta por um trabalho anterior de Barros et al. (2017), DALMEDICO, J. F. et al. (2018) em tres dimensões.

2 I MODELO CINEMÁTICO

Segundo Craig (2005) a cinemática é a ciência do movimento que estuda as derivadas de alta ordem da posição, como velocidade e aceleração, sem considerar as forças que a causam. No âmbito da robótica de manipulador, refere-se a todas as propriedades geométricas e as propriedades em relação ao tempo de movimento. A cinemática direta propõe o estudo analítico do movimento de um braço robótico em relação a um sistema cartesiano e sua solução encontra a posição final partindo dos ângulos das juntas.

Um manipulador é braço composto por um conjunto de seções e juntas podendo ser prismáticas, de revolução, de rosca ou esféricas. As equações cinemáticas utilizam parâmetros das juntas para determinar a posição do efetuador. A Figura1 mostra um modelo de 2 graus de liberdade (GDL) onde L_1 e L_2 sendo a dimensão das seções 1 e 2 do braço, θ_1 e θ_2 os ângulos das juntas 1 e 2 e (x,y) o ponto desejado no final da garra do manipulador.

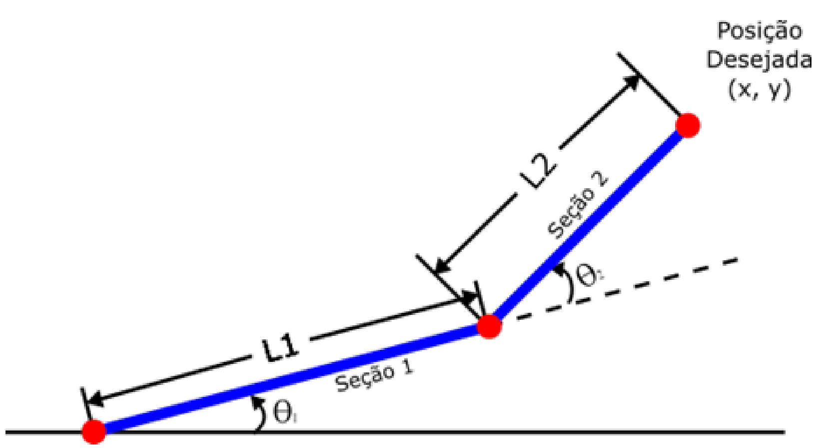


Figura 1 – Modelo cinemático de um braço robótico de 2GDL em 2D

Ao contrário da cinemática direta, a cinemática inversa do manipulador busca as

coordenadas em graus para uma posição cartesiana final do braço. Todavia, esse processo não possui uma solução única e precisa ser calculado numericamente (CORKE, 2011). A solução pode partir de uma RNA treinada através de uma nuvem de pontos determinados pelos parâmetros de Denavit-Hartenberg (DH). Esses parâmetros possibilitam expressar a cinemática do manipulador para cada junta considerando um eixo de coordenadas em cada seção do braço. Na Figura 2 apresenta-se os seus parâmetros a_i, α_i, d_i and θ_i por junta i (CRAIG, 2005).

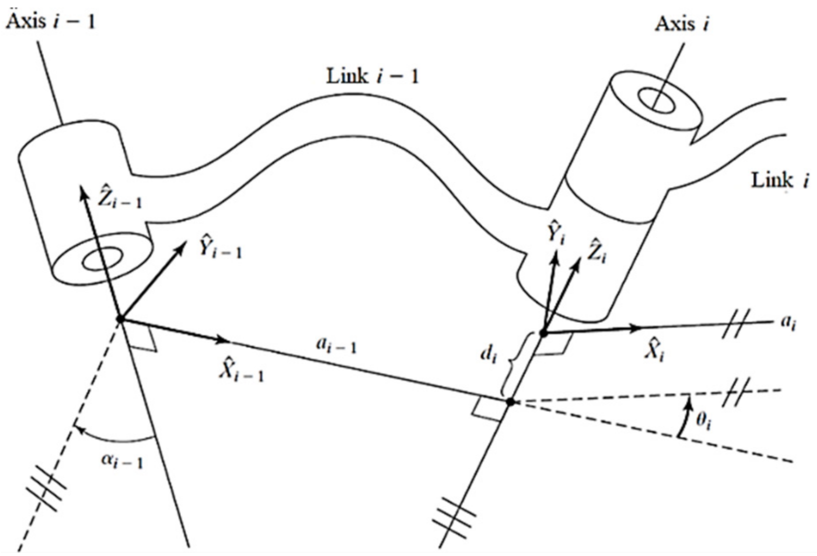


Figura 2 – Seções e juntas do modelo DH

Uma descrição dos parâmetros abaixo:

a) α_i é a distância do eixo $\hat{Z}_i$ ao $\hat{Z}_{i+1}$ medida em $\hat{X}_i$;

b) α_i é o ângulo entre os eixos $\hat{Z}_i$ e $\hat{Z}_{i+1}$ medida em $\hat{X}_i$;

c) d_i é a distância do eixo $\hat{X}_{i-1}$ ao $\hat{X}_i$ medido em $\hat{Z}_i$;

d) θ_i é o ângulo entre os eixos $\hat{X}_{i-1}$ to $\hat{X}_i$ medido em $\hat{Z}_i$.

Cada junta é definida pela matriz da Equação (1) (CRAIG, 2005)(Craig, 2005)(Craig, 2005).

$$T_i^{i-1}(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i) = \begin{bmatrix} C\,\theta_i & -S\,\theta_i\,C\,\alpha_i & S\,\theta_i\,C\,\alpha_i & a_i\,C\,\theta_i \\ S\,\theta_i & C\,\theta_i\,S\,\alpha_i & -C\,\theta_i\,S\,\alpha_i & \alpha_i\,S\,\theta_i \\ 0 & S\,\alpha_i & C\,\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1)$$

Se tratando de 2 GDL, o DH matricial será:

$$T_2^0 = T_1^0 \times T_2^1 \qquad (3)$$

O modelo DH usado neste trabalho é mostrado na Tabela 1, é definido pelo robô da Figura 3.

Seção	α (°)	D (mm)	A (mm)	Θ (°)
1	90	70	0	θ_1
2	0	0	142	θ_2
3	-90	0	145	θ_3

Tabela 1 –Parâmetros do Modelo DH

Fonte: Autoria Própria



Figura 3 – Robô AR7 base para os parâmetros DH da simulação

3 I VISÃO COMPUTACIONAL

A visão computacional se relaciona com as formas que um computador ou maquina vê o ambiente ao redor (GONZALEZ; WOODS, 2002). A captação de imagens é fundamental para manipuladores assim como é para humanos. Da mesma forma que o cérebro identifica objetos e características do ambiente, o robô precisa igualmente processar a imagem capturada pela câmera (BEM-ARI; MONDADA, 2018). O primeiro passo é a calibração de câmera, pois ela permite uma correlação entre as coordenadas da imagem e as coordenadas do mundo real, incluindo parâmetros com o posição, orientação e centro focal (WOO; PARK, 2009).

No procedimento de calibração, a simulação considera uma câmera posicionada de modo a captar todo o campo de visão dentro do alcance do braço no plano 2D desejado. A calibração de câmera é feita pelo algoritmo de Harris (Harris Corner Extraction Algorithmno) no MATLAB® que extrai os vértices da imagem 2D, vista na Figura 4, e cria uma relação da distância entre vértices na imagem e a distância verdadeira de 20 mm no mundo real (JIN;

RUI, 2011)(GUO; HE; GUAN, 2017)(SUN et al., 2016)(YUAN et al, 2013).

A Figura 4 apresenta os vértices do tabuleiro representados por “+” verdes, e a nuvem de pontos do DH, em “x” vermelhos.

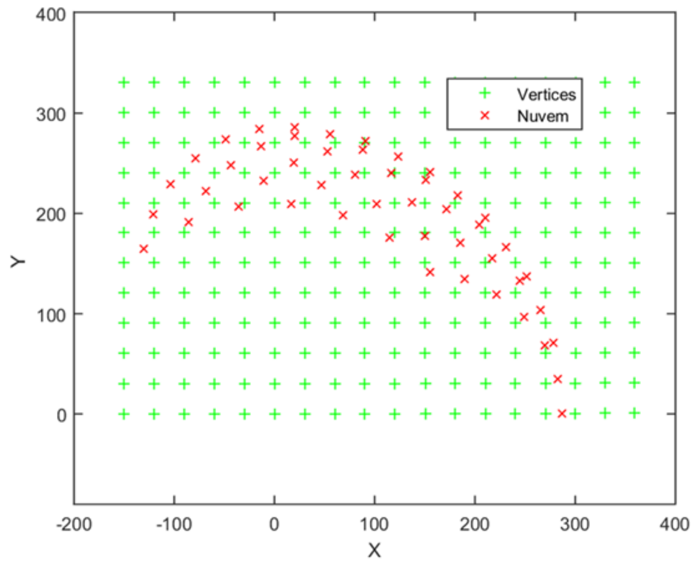


Figura 4 – Nuvem de pontos sobre o tabuleiro de calibração 2D

4 I REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Redes Neurais Artificiais são métodos computacionais inspirados no sistema nervoso humano. Possuem capacidade de aquisição e manutenção de conhecimento e podem ser definidas como conjuntos de unidades de processamento. Cada uma delas é caracterizada por neurônios artificiais e são interligados por muitas interconexões ou sinapses artificiais representadas por vetores e matrizes de pesos sinápticos (DA SILVA et al., 2017). Generalizando, RNAs são máquinas que modelam uma solução para uma tarefa específica ou problema em particular. Sua implementação é realizada em simulação de software computacional ou por componentes eletrônicos (HAYKIN, 2009). De um modo geral, As redes neurais artificiais (ANNs) são compostas por camadas de um nó, contendo uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída. Cada nó, ou neurônio artificial, conecta-se a outro e tem um peso e um limite associados (Barros et al., 2017).

O uso desse método apresenta benefícios quanto ao custo computacional. O seu algoritmo tem a habilidade de chegar a soluções aproximadas de problemas complexos pela sua estrutura de distribuição paralela maciça e capacidade de treinamento (aprendizado). Na prática, RNAs precisam ser integradas a sistemas com aplicação em engenharia

(HAYKIN, 2009). Neste contexto estão diversos problemas como aproximar funções, controle de processos, reconhecimento de padrões, sistemas de previsão entre outros. O Comportamento dos neurônios está diretamente ligado ao algoritmo de aprendizado escolhido para o treinamento e pode ser classificado em três classes fundamentais: camada única, multicamada e recurrent network (HAYKIN, 2009).

5 | TREINAMENTO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A fase de treinamento visou desenvolver RNAs para exercer duas tarefas simultaneamente: a calibração da câmera e a solução da cinemática inversa. Os dados de treinamento consistem em escolher os vértices do tabuleiro dentro do alcance do robô. Esses pontos de coordenada cartesiana (x,y) possuem uma coordenada (θ_1,θ_2) correspondente das juntas do braço. O levantamento de dados foi feito utilizando o *solver* do MATLAB® para simular uma medição manual do operador. Cada solução encontrada obedecia a um padrão para que se evitasse erro no treinamento.

6 | SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A proposta desta análise topológica é investigar a quantidade ideal de neurônios por camada com o menor erro. O estudo se divide em três topologias diferentes no número de camadas e iguais no total de neurônios. A Figura 5 mostra o passo a passo da simulação dividindo as topologias em três colunas: sendo a primeira coluna correspondendo a um RNA de 1 camada e as demais colunas referentes às RNAs de 2 e 3 camadas. Os critérios de comparação utilizados foram as médias do erro relativo e do desvio para os eixos X e Y no plano cartesiano.

O algoritmo de treinamento foi o Levenberg-Marquadt (L-M) com função de ativação tangente hiperbólico (tansig) nas camadas intermediarias e a função rampa simétrica (ramp) na camada de saída. O método de validação cruzada foi utilizado na busca de um mínimo local do erro (Haykin, 2009) e buscou-se empiricamente um erro de performance de no mínimo $1{,}0X\ 10^{-8}$.

A Figura 6 mostra o resultado da simulação em MATLAB® para uma camada de neurônios. As fases de treinamento e teste foram executadas num total de 10 vezes. Inicialmente, 6 neurônios foram introduzidos no treinamento do RNA e a cada novo treinamento, 6 neurônios eram incrementados.

Seguindo a mesma lógica da ilustração anterior, na Figura 7 os resultados são igualmente explanados, porém se diferem pela distribuição proporcional de neurônios em suas duas camadas. A determinação do número de neurônios em cada camada foi incremental de 3 em 3 até 30.

A última topologia de três camadas presente na Figura 8 possui distribuição análoga

as anteriores assim como a sua determinação do número de neurônios de 2 em 2 até 20.

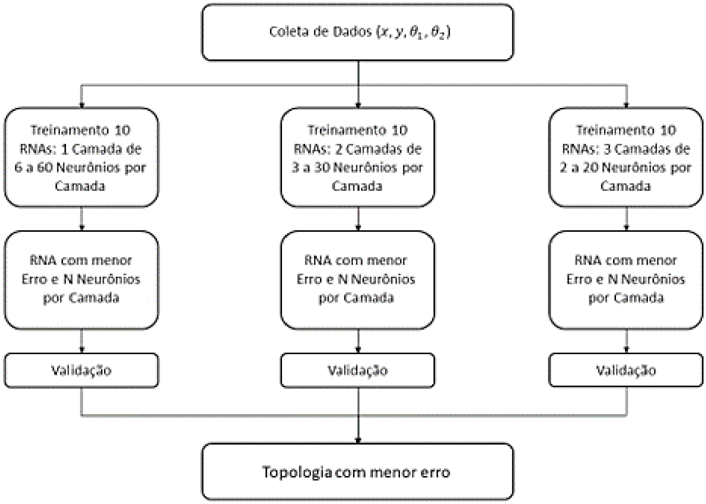


Figura 5 – Passo a passo da simulação

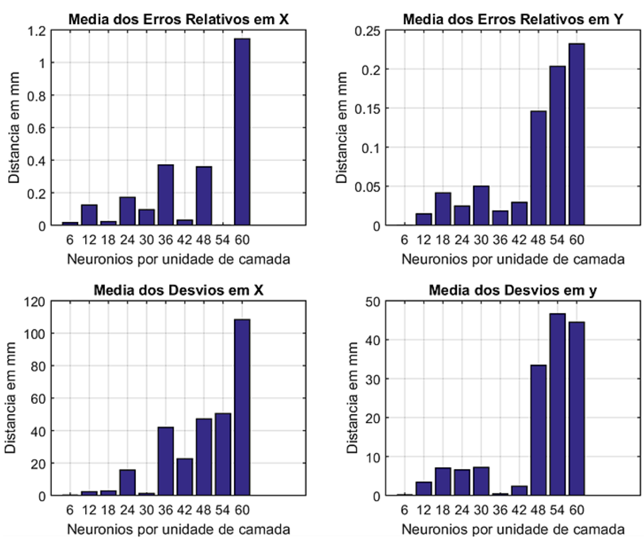


Figura 6 – Erros relativos de X e Y e Media de Erros relativos presente na Topologia de uma camada de neurônios

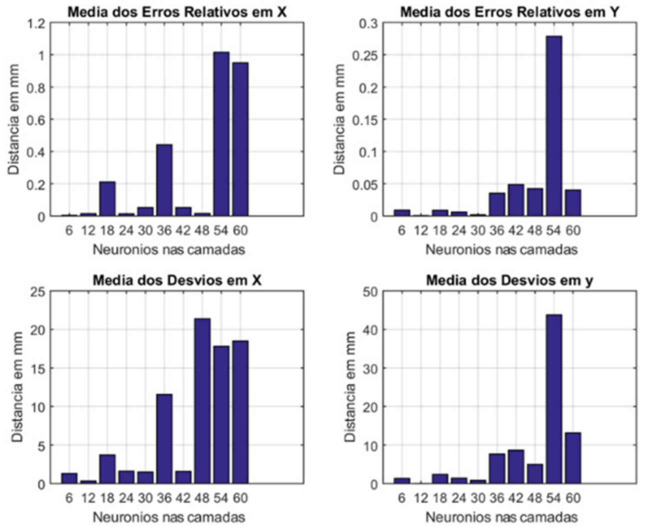


Figura 7 – Erros relativos de X e Y e Media de Erros relativos presente na Topologia de duas camadas de neurônios

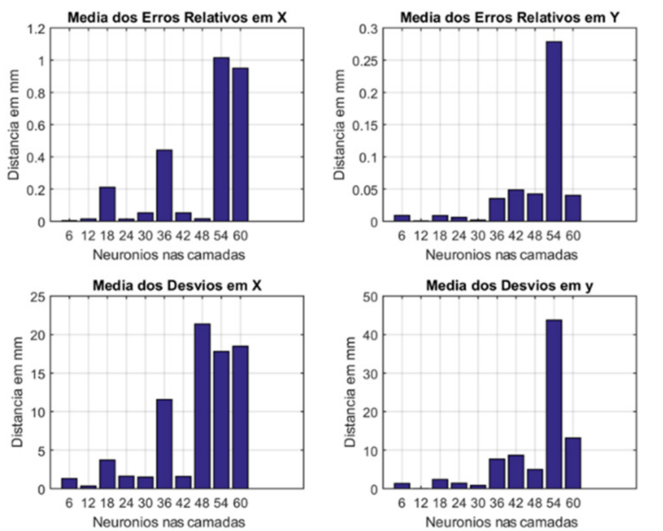


Figura 8 – Erros relativos de X e Y e Media de Erros relativos presente na Topologia de três camadas de neurônios

7 I ESCOLHA DAS MELHORES TOPOLOGIAS

A melhor configuração para cada topologia significa a menor ocorrência de erro se comparadas nos três casos. Os pontos testados em todos os casos foram os mesmos e por isso a comparação entre os resultados desta fase pode ser realizada. Esses superparâmetros muitas vezes são escolhidos de forma empírica ou usando técnicas de poda de neurônios e camadas ou de forma incremental.

Vale notar que, como o sistema de treinamento escolhido foi o offline, o número de épocas das topologias não foi considerado relevante e servia como critério de parada. Todavia, treinamentos foram excluídos ao atingirem o número máximo de épocas sem alcançar o mínimo coeficiente de performance.

Analisando a média de erros relativos e de desvios em ambos os eixos, percebe-se que, no geral, os testes apresentaram melhores resultados quando as RNAs foram treinadas com 12 neurônios distribuídos entre as camadas de cada caso. Todavia, se analisados separadamente, a topologia com 6 neurônios teve o menor erro para uma camada. Este resultado é desconsiderado devido a validação cruzada, pois, como visto na Tabela 2, o coeficiente de performance não atingiu o critério de parada desejado de 1,0 x 10^{-8} e parou antes ao atingir o número limite de 5.000 épocas de treinamento.

O coeficiente de performance (training performance) é uma função presente no Software MATLAB® para avaliar o desempenho da rede neural artificial. Essa ferramenta calcula do erro quadrático médio (MSE) na comparação entre o resultado desejado pelo treinamento e o resultado atingido a cada época de treinamento (MATHWORKS, 2006).

Neurônios	Performance do caso 01	Épocas do caso 01	Performance do caso 02	Épocas do caso 02	Performance do caso 03	Épocas do caso 03
6	**$6{,}7761\times10^{-05}$**	5000	**$1{,}2613\times10^{-04}$**	5000	**$2{,}9433\times10^{-04}$**	5000
12	**$9{,}9798\times10^{-09}$**	2583	**$9{,}9967\times10^{-09}$**	1096	**$9{,}9923\times10^{-09}$**	2408
18	**$9{,}9137\times10^{-09}$**	184	**$7{,}4371\times10^{-09}$**	99	**$9{,}6415\times10^{-09}$**	268
24	**$4{,}5780\times10^{-10}$**	69	**$6{,}2473\times10^{-11}$**	9	**$6{,}1545\times10^{-10}$**	9
30	**$8{,}8001\times10^{-09}$**	13	**$3{,}8868\times10^{-10}$**	6	**$8{,}4195\times10^{-11}$**	28
36	**$1{,}8970\times10^{-12}$**	5	**$9{,}0038\times10^{-09}$**	6	**$1{,}9863\times10^{-13}$**	11
42	**$9{,}5512\times10^{-12}$**	5	**$5{,}4463\times10^{-16}$**	5	**$7{,}0409\times10^{-15}$**	9
48	**$3{,}7422\times10^{-09}$**	4	**$6{,}2169\times10^{-09}$**	4	**$4{,}8235\times10^{-10}$**	6
54	**$7{,}4396\times10^{-14}$**	4	**$3{,}3486\times10^{-11}$**	4	**$1{,}3676\times10^{-09}$**	5
60	**$3{,}0722\times10^{-13}$**	4	**$1{,}1007\times10^{-09}$**	4	**$1{,}2183\times10^{-15}$**	5

Tabela 2 – Coeficiente de Performance e Épocas das Topologias

Fonte: Autoria Própria

8 | VALIDAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Etapa de validação permite constatar qual o número de camadas se adequa a quantidade de neurônios escolhida na seção anterior. Como na seção de topologias, o processo é dividido em três casos distribuindo proporcionalmente os 12 neurônios entre as camadas, mantendo as configurações dos RNAs anteriores.

O primeiro caso possui uma única camada com 12 neurônios. A Figura 9 é dividida em duas partes para um melhor entendimento dos resultados obtidos após a validação. A Figura 9(a) compara a posição dos pontos de validação – círculos em vermelho – e

os pontos calculados pela RNA – asteriscos em azul. Já na Figura 9(b), um histograma distribui os pontos entre intervalos de desvio em ambos os eixos X e Y em milímetros. Nota-se que alguns pontos apresentaram desvio maior que 4 mm no eixo Y.

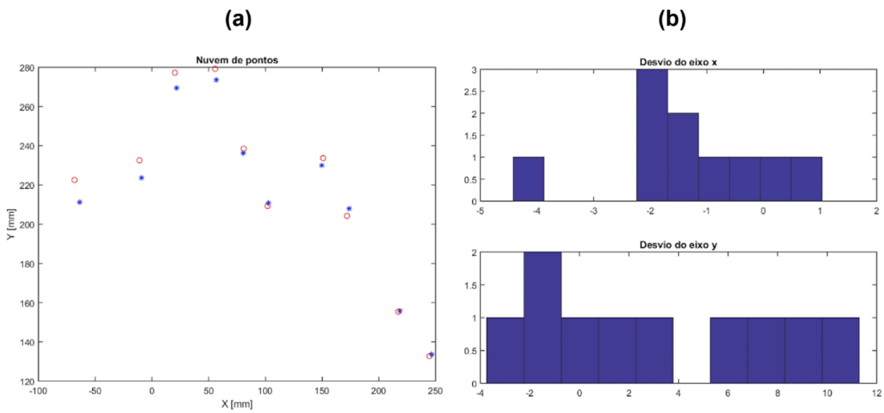


Figura 9 – (a) validação dos pontos, onde círculos são os pontos desejados e os asteriscos são os pontos calculados pela RNA, e (b) histograma dos desvios dos pontos em milímetros

O segundo caso possui 12 neurônios distribuídos igualmente por duas camadas, mantendo as configurações de validação anteriores. A Figura 10(a) mostra uma maior aproximação entre os círculos vermelho – pontos de validação – e os asteriscos azuis – pontos calculados pela RNA treinada com duas camadas. Logo, na Figura 10(b), os histogramas mostram uma maior concentração de pontos com desvios em X e Y próximos de zero, embora dois pontos apresentem desvios muito altos.

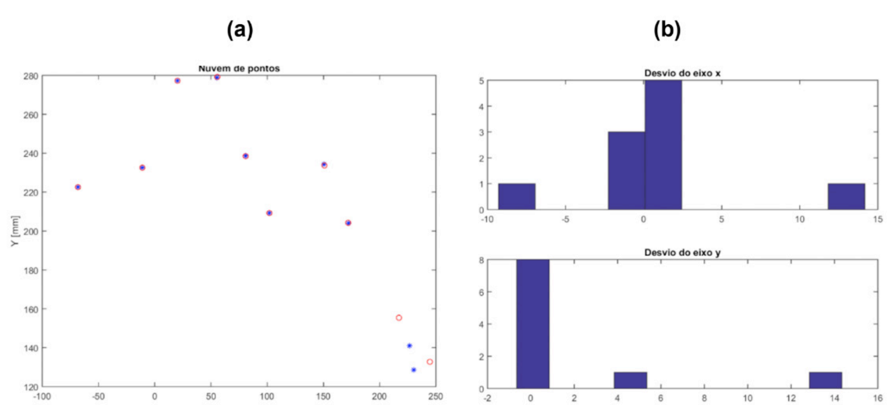


Figura 10 – (a) validação dos pontos, onde círculos são os pontos desejados e os asteriscos são os pontos calculados pela RNA, e (b) histograma dos desvios dos pontos em milímetros

Enfim, o último caso distribuiu os 12 neurônios entre 3 camadas para o treinamento. Os resultados apresentaram melhor precisão, na Figura 11(a), devido a uma maior aproximação entre os pontos de validação e os pontos calculados pela rede, se comparado com os casos anteriores. Analisando os histogramas na Figura 11(b), percebe-se uma maior quantidade de pontos com desvio próximo a zero. O terceiro caso apresentou um desvio em ambos os eixos dentro de um intervalo entre -1 mm e 1 mm, 15 vezes menor em comparação com os outros dois casos

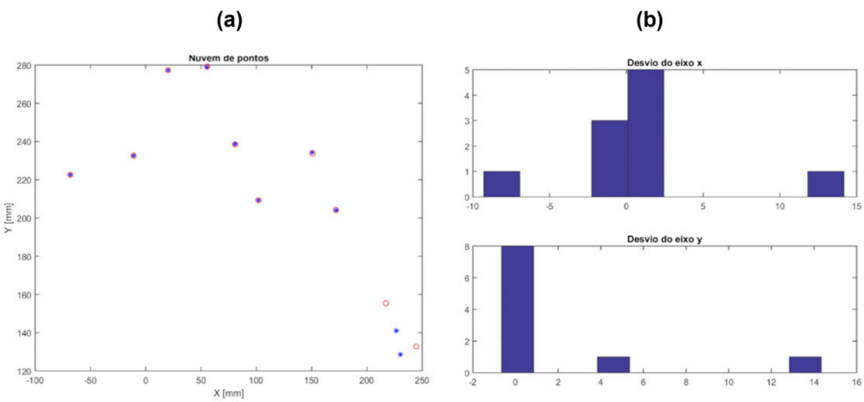


Figura 11 – (a) validação dos pontos, onde círculos são os pontos desejados e os asteriscos são os pontos calculados pela RNA, e (b) histograma dos desvios dos pontos em milímetros

9 I CONCLUSÃO

A proposta de unir a calibração de câmera à solução da cinemática inversa no treinamento da mesma RNA mostrou-se mais precisa para 4 neurônios em 3 camadas (total de 12) se comparado aos outros casos de 1 e 2 camadas. A precisão apresentada mostrou uma aproximação menor que 1 mm entre os pontos calculados pela RNA e os pontos de validação.

Desvios menores que 0,2 mm em módulo foram observado no eixo X, por 4 pontos, e no eixo Y, por 8 pontos, enquanto que os outros casos mostraram desvios maiores que 1 mm em muitos pontos – alguns com até 14 mm. Esse método se mostra eficiente na economia computacional ao exercer a função de duas RNAs em apenas uma, economizando também tempo na coleta de dados para treinamento e solução do problema. Futuros trabalhos endereçam inserir planejamento de trajetória aplicando esse método proposto em um manipulador robótico por meio de visão computacional utilizando duas câmeras em 3 dimensões.

Futuros trabalham endereçam a localização de um robô humanoide e sua pose com imagens e dimensões do mesmo.

REFERÊNCIAS

Barros, R. V. P. D. et al. (2017) 'Visão Computacional e Redes Neurais Artificiais aplicadas à solução da cinemática inversa de um manipulador robótico', in VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa, PR, BR: APREPRO.

BEN-ARI, M.; MONDADA, F. *Elements of Robotics.* Springer International Publishing, 2018.

CORKE, P. *Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

Craig, J. J. (2005) Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 3rd edn. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall.

DALMEDICO, J. F. et al. **Artificial Neural Networks Applied in the Solution of the Inverse Kinematics Problem of a 3D Manipulator Arm**. 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). **Anais**...Rio de Janeiro, RJ, Brazil: IEEE, jul. **GONZALEZ, R. C.; WOODS., R. E.** *Digital Image Processing.* 6 ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2002.

GUO, F., HE, Y.; GUAN, L. RGB-D. *Camera Pose Estimation Using Deep Neural Network.* IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), p. 408–412, 2017.

Haykin, S. (2009) Neural Networks and Learning Machines. 3rd edn. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

JIN, L. G.; RUI, L. G. *Camera Calibration for Monocular Vision System Based on Harris Corner Extraction and Neural Network.* International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), p. 1–4, 2011.

MATHWORKS. *Mean Squared Normalized Error Performance Function (MSE).* Available in: <*https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/mse.html?searchHighlight=mse&s_tid=doc_srchtitle*>. Accessed: 06 nov. 2018.

MISHRA, A. K.; MERUVIA-PASTOR, O. *Robot Arm Manipulation Using Depth-Sensing Cameras and Inverse Kinematics.* Oceans - St. John's, p. 1–6, 2014.

MUSSABAYEV, R. R. *Colour-Based Object Detection, Inverse Kinematics Algorithms and Pinhole Camera Model for Controlling Robotic Arm Movement System.* Twelve International Conference on Electronics Computer and Computation (ICECCO), p. 1–9, 2015.

DA SILVA, I. N. ET AL. *Artificial Neural Networks: A Practical Curse.* 1 ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

SUN, J. ET AL. *Camera Calibration and Its Application of Binocular Stereo Vision Based on Artificial Neural Network.* 9th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), p. 761–765, 2016.

WOO, D.; PARK, D. *Implicit Camera Calibration Using MultiLayer Perceptron Type Neural Network.* First Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, p. 313–317, 2009.

YUAN, M. ET AL. *A New Camera Calibration Based on Neural Network with Tunable Activation Function in Intelligent Space.* Sixth International Symposium on Computational Intelligence and Design, p. 371–374, 2013.

ZOU, A. ET AL. *Neural Networks for Mobile Robot Navigation: A Survey*. Advances in Neural Networks - ISNN 2006, n. 2, p. 1218–1226, 2006.

SISMOS: BREVE ABORDAGEM TEÓRICA SOBRE SUA AÇÃO SOBRE ESTRUTURAS, CONTROLE DAS VIBRAÇÕES E DISPOSITIVOS DE CONTROLE PASSIVOS

Data de aceite: 02/01/2023

Tarciso Melo Claudino
Graduando em Engenharia Mecânica Empresarial, Universidade Federal do Rio Grande – FURG
Bolsista de iniciação Científica do CNPq

Natanael de Paula e Silva
Graduando em Engenharia Mecânica Empresarial, Universidade Federal do Rio Grande – FURG

RESUMO: A ação de sismos ou denominados terremotos sobre estruturas tem causado ao longo da história grandes danos à humanidade. Em virtude de ser um fenômeno inevitável quando causado por ação natural, a engenharia civil tem se aperfeiçoado nas últimas décadas para minimizar os danos ocorridos em estruturas que não estavam projetadas para suportar as excitações causadas pelos sismos. Com o avanço dos estudos na área sísmica e da tecnologia, os países mais vulneráveis a essas ações, principalmente os mais desenvolvidos, vem empregando em suas estruturas dispositivos auxiliares com a finalidade de suportar os tremores de terra sob as edificações. Este trabalho tem como foco explorar brevemente os estudos desenvolvidos até então sobre como são originados estes fenômenos, a ação dinâmica dos sismos sobre edificações, os métodos de controle de vibrações e alguns exemplos de equipamentos empregados em estruturas situadas em diversas localidades do planeta.

PALAVRAS-CHAVE: Sismos. Estruturas. Ações sobre edifícios. Controle. Dispositivos de controle passivos.

EARTHQUAKES: BRIEF THEORETICAL APPROACH ABOUT THEIR ACTION ON STRUCTURES, CONTROL OF VIBRATION AND PASSIVE CONTROL DEVICES

ABSTRACT: The action of earthquakes or so-called earthquakes on structures has caused great damage to humanity throughout history. By virtue of being an inevitable phenomenon when caused by natural action, civil engineering has been perfected in recent decades to minimize damage to structures that were not designed to withstand the excitations caused by earthquakes. With the advancement of studies in the seismic area and technology, the countries most vulnerable to these actions, especially the more developed ones,

have been employing auxiliary devices in their structures in order to withstand earthquakes under the buildings. This work focuses on briefly exploring the studies developed so far on how these phenomena originate, the dynamic action of earthquakes on buildings, methods of vibration control and some examples of equipment used in structures located in different locations on the planet.
KEYWORDS: Earthquakes. Structures. Actions on buildings. Control. Passive control devices.

1 I INTRODUÇÃO

Os desastres naturais representam um conjunto de fenômenos que fazem parte da geodinâmica terrestre, em suma da natureza do planeta. Segundo Bolt (2003), um desses efeitos são os terremotos, ou também denominados sismos, que em virtude de sua ocorrência podem trazer consequências catastróficas para o ser humano. Por mais que estudos e tecnologias antissísmicas estão sendo empregadas, muitos desses desastres são imprevisíveis. Em decorrência da constante movimentação das placas tectônicas flutuantes sobre o magma na crosta terrestre, regiões próximas ao encontro dessas placas são consideradas mais suscetíveis (BOLT, 2003). O poder de destruição causados pelos sismos é enorme, segundo aponta o site da *British Broadcasting Corporation* (BBC), os cinco sismos que causaram maior números vítimas na América Latina ocorreram no Haiti, em 2010, que resultou em um total de 316 mil mortos, já no Peru em 1970, com 66 mil mortos, no Chile em 1939 ocasionando 24 mil vítimas fatais, na Guatemala em 1976, resultando em 23 mil mortes e na Nicarágua onde o poder de destruição do sismo, ocasionou a fatalidade de mais de 10 mil mortos. Pode-se observar que mesmo com a evolução da engenharia sísmica as maiores destruições ocorreram em países menos desenvolvidos, países mais desenvolvidos localizados em zonas sísmicas de intensa atividade como o Japão, sofrem constantemente com os tremores de terra, entretanto estão mais preparados para minimizar os desastres em decorrência desses fenômenos.

Nos últimos anos tem se intensificado a pesquisa no âmbito dos sistemas de proteção sísmica na área da engenharia civil, para obtenção da melhor resposta das estruturas, mediante a ocorrência dos sismos, principalmente em regiões com maior sismicidade, a fim da redução do número de mortes e destruição causas pelas ações sísmicas. Os estudos no controle das vibrações como sistemas de proteção sísmica também vêm evoluindo, com objetivo de promover a alteração nas propriedades de rigidez e amortecimento nas edificações, tanto pela forma de adição de dispositivos externos ou pela ação de forças externas, podendo serem classificados com controle passivo, ativo, híbrido ou semiativo (AVILA, 2002).

Tendo em vista a proteção antissísmica, diversos equipamentos estão sendo empregados em diversas estruturas no planeta, entretanto, em sua maioria, se não totalmente, em países com maior desenvolvimento, tendo em vista conferir um maior nível de segurança em edifícios, com o objetivo de diminuir as excitações nas estruturas, à custa

de alterações, ao nível da frequência ou do aumento da capacidade de dissipação de energia com conjunto de proteção associado à estrutura.

Alguns dispositivos são citados neste trabalho, classificados como histeréticos, viscoelásticos, absorvedores dinâmicos de vibrações e o emprego dos considerados “materiais inteligentes”, todos eles, com objetivo de assegurar os edifícios sob as ações sísmicas, proporcionado a minimização no âmbito catastrófico decorrido dos terremotos (CONSTANTINOU et al., 1998).

2 | DESENVOLVIMENTO

2.1 Sismos

A crosta terrestre é constituída por várias placas tectônicas que flutuam sobre o magma, estando livres para se movimentarem, sua disposição está representada na Figura 1. Quando ocorre o choque entre as placas em virtude de sua movimentação, ocorrem a formação dos sismos, sendo vibrações bruscas e passageiras que atingem a superfície terrestre. Estes fenômenos são geralmente gerados pela liberação da energia resultante do contato entre as placas, e propagam- se em todas as direções sob a forma de ondas sísmicas (SANTOS, 2021).

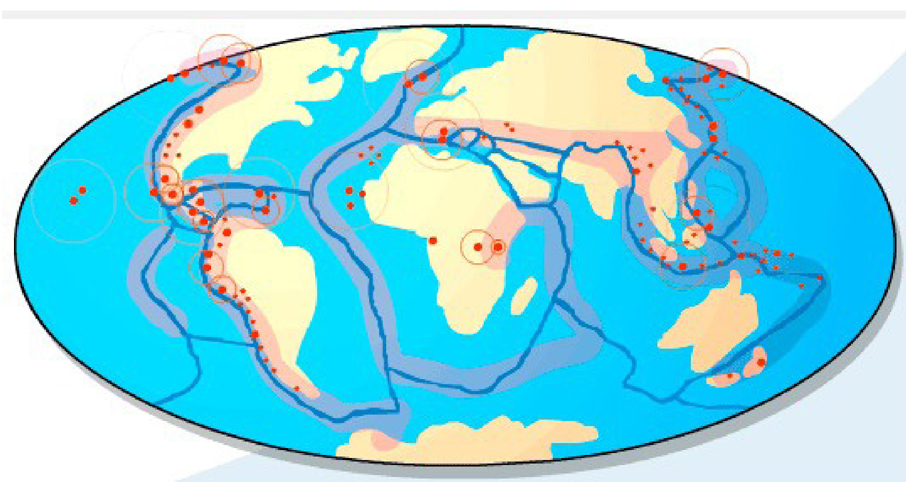


Figura 1 – Distribuição das placas tectônicas no planeta.

Fonte: <https://atlasescolar.ibge.gov.br/a-terra/formacao-dos-continentes>, acesso: 18 de janeiro de 2022.

Existem sismos naturais e artificiais, dos quais os naturais são ocasionados pelos choques entre as placas ou falhas geológicas nas mesmas. Por outro lado, os sismos artificiais são causados por ações humanas, por exemplo, devido a explosões, testes

nucleares, ou em grandes impactos no solo, em perfurações a procura de petróleo e gás (BRANDÃO, 2021).

O local no interior da terra onde inicia a ruptura e consequentemente a liberação da energia armazenada é denominado hipocentro e sua projeção denomina-se epicentro. Soma-se a isso a distância entre o hipocentro à superfície terrestre e descrita como distância focal (ASSUMPÇÃO; DIAS NETO, 2000).

Nos estudos de Rossato (2017) foram destacados que a maioria dos sismos ocorrem com maior frequência em regiões de elevada sismicidade, em virtude sobretudo da sua localização geográfica, em suma, situam-se em posições próximas ao encontro de placas tectônicas.

Peña (2012) descreve que o sismo possui três componentes ortogonais entre si, uma vertical e duas horizontais, para as quais as grandezas mais significativas são a duração, amplitude e conteúdo de frequência do evento.

2.1.1 Tipos de ondas sísmicas

Os sismos são considerados ondas mecânicas que chegam à superfície da terra a partir do hipocentro e classificam-se como ondas de corpo e superficiais. As ondas de corpo, ou denominadas volumétricas são divididas em primárias (P), onde se propagam de maneira longitudinal e ondas secundárias (S), propagando-se transversalmente, sendo as duas geradas no hipocentro. Entretanto as ondas superficiais são formadas pelas combinações das ondas de corpo quando atingem a superfície. Elas são divididas em dois tipos: Ondas Rayleigh (R) e Ondas Love (L). A Figura 2, refere-se aos estudos de Assumpção e Dias Neto (2000), apresentam as configurações dessas ondas, assim como referência do texto acima descrito.

Conforme Clough e Penzien (2003), os sismógrafos detectam primeiramente as ondas “P”, em virtude de serem mais velozes, e atuam na direção de propagação causando a compressão e expansão do material. Todavia, as ondas tipo “S” são cisalhantes, e seu movimento é perpendicular a direção da propagação. Dessa forma a passagem da onda transversal obriga os planos verticais do meio se movimentarem para baixo e para cima, ocasionando aos elementos adjacentes a variações de forma. Segundo Reis *et al.* (2012), as ondas Rayleigh e Love apresentam menores velocidades, entretanto possuem um elevado poder de destruição.

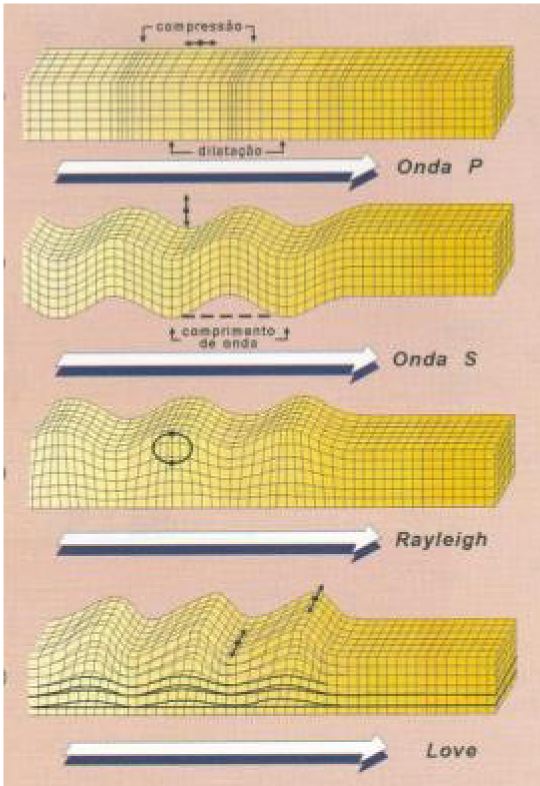


Figura 2 – Tipos de ondas sísmicas.

Fonte: ASSUMPÇÃO; DIAS NETO, 2000.

2.1.2 Magnitude e intensidade sísmica

A diferença entre magnitude e intensidade sísmica são conceituais, segundo Peña (2012), a magnitude sísmica é a medida da quantidade de energia liberada durante o sismo. Para Clough e Penzien (2003), a intensidade sísmica representa a percepção das pessoas em relação a vibração do solo e aos danos produzidos, ressalta-se ainda que a intensidade tende a diminuir com o distanciamento do epicentro.

2.2 Ação dinâmica dos sismos

A variação do carregamento ao longo do tempo caracteriza o carregamento dinâmico, seja em posição, direção ou magnitude. Os sismos se caracterizam como ações de natureza dinâmica transiente, em virtude de sua vibração em função do tempo, entretanto não são periódicos. A ação advinda dos sismos é considerada como uma excitação de suporte, em virtude ao movimento do solo é gerada uma aceleração na base das estruturas (BRANDÃO, 2021). A Figura 3, exemplifica a ação dos sismos sobre uma estrutura de um Grau de Liberdade (GDL), onde possui uma massa (m), duas molas idênticas de mesma rigidez, onde em paralelo resulta na rigidez total (k) e um amortecedor viscoso com constante de

amortecimento (c).

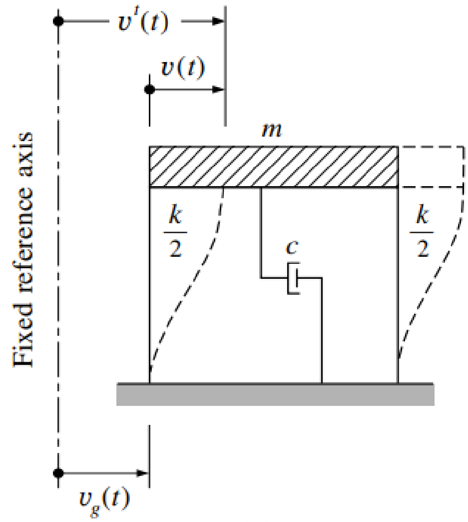


Figura 3 – Sistema de um Grau de liberdade submetido a aceleração na base em virtude sísmica.

Fonte: CLOUGH; PENZIEN, 2003.

Dessa forma, podemos constatar:

$$v^t(t) = v(t) + v_g(t) \tag{1}$$

Onde:

$v^t(t)$: Refere-se ao deslocamento total da estrutura;

$v(t)$: Refere-se ao deslocamento relativo do sistema;

$v_g(t)$: Refere-se ao deslocamento da base em virtude do sismo.

Sendo que a Equação 1, salienta o deslocamento total da estrutura tendo como referência a composição dos deslocamentos em função do sismo e o deslocamento relativo do sistema.

A partir da Equação 1, podemos descrever o deslocamento total da estrutura em termos das acelerações do sistema:

$$\ddot{v}^t(t) = \ddot{v}(t) + \ddot{v}_g(t) \tag{2}$$

$\ddot{v}^t(t)$: Refere-se à aceleração total da estrutura;

$\ddot{v}(t)$: Refere-se à aceleração relativa do sistema;

$\ddot{v}_g(t)$: Refere-se à aceleração da base em virtude do sismo.

A Equação 2 apresenta a composição das acelerações sobre a estrutura, sob

ocorrência de um sismo.

De acordo com Brandão (2021), para analisar as forças que agem no sistema, utiliza-se o princípio de equilíbrio das forças, sendo $f_1(t) = m \,.\, \ddot{v}(t)$, representando a força de inércia do sistema, $f_A(t) = c \,.\, \dot{v}(t)$, indicando a força de amortecimento do sistema e correspondente a força elástica, expressa-se a função $f_E(t) = k \,.\, v(t)$, sendo que a força de inercial "$f_1(t)$" considera o deslocamento total da estrutura, consequentemente a aceleração "$\ddot{v}^t\,(t)$",tendo como resultado:

$$f_1(t) + f_A(t) + f_E(t) = 0 \qquad (3)$$

Determinada a Equação 3, pode-se obter a equação diferencial do movimento para o sistema com um Grau de Liberdade, submetido a aceleração de excitação na base, a qual ocasiona em uma força em relação a excitação.

$$m \,.\, \ddot{v}(t) + c \,.\, \dot{v}(t) + k \,.\, v(t) = -m \,.\, \ddot{v}_g\,(t) \qquad (4)$$

Onde a Equação 4 representa a equação diferencial do movimento para o sistema com um Grau de Liberdade submetido a aceleração do sismo. Pode-se observar que a força sísmica é diretamente proporcional a massa.

Segundo Brandão (2021), para sistemas com Múltiplos Graus de Liberdade (MGDL), o equilíbrio dinâmico é feito para cada GDL, conseguindo representar a equação de movimento de um sistema na sua forma matricial:

$$\boldsymbol{M} \,.\, \vec{\ddot{\boldsymbol{v}}}\,(t) + \boldsymbol{C} \,.\, \vec{\dot{\boldsymbol{v}}}\,(t) + \boldsymbol{K} \,.\, \vec{\boldsymbol{v}}(t) = \vec{\boldsymbol{F}}(t) \qquad (5)$$

No qual a Equação 5 apresenta a equação diferencial do movimento de um sistema de Múltiplos Graus de Liberdade na sua forma matricial.

M= Representa a matriz de massa;

C= Representa a matriz de amortecimento;

K= Representa a matriz de rigidez;

$\vec{\ddot{\boldsymbol{v}}}\,(t)$= Representa o vetor aceleração;

$\vec{\dot{\boldsymbol{v}}}\,(t)$=Representa o vetor velocidade;

$\vec{\boldsymbol{v}}(t)$=Representa o vetor deslocamento;

$\vec{\boldsymbol{F}}(t)$=Representa o vetor das forças.

Com as EDO´S supracitadas, pode-se obter o deslocamento resultante no edifício, devido a ação dos sismos, desenvolvimento ao qual não será emprego nesse artigo, deixando como encaminhamento para estudos posteriores, a fim de neste texto apresentar o controle de vibrações e alguns dispositivos auxiliares de controle.

2.3 Sistemas de proteção sísmica - controle das vibrações

As evoluções das técnicas de estudo, dimensionamentos de estruturas e implementações com evoluções nas áreas de materiais e técnicas de construção, resultou em projetos de edificações de maiores dimensões e esbeltez, dessa forma, mais flexíveis. Como resultado, as edificações mais altas e esbeltas estão mais expostas à ocorrência de vibrações excessivas advindas de carregamentos dinâmicos (TREIN, 2003).

Buscando reduzir essas vibrações, o estudo do controle estrutural vem sendo abrangido. Ele tem como objetivo promover a alteração nas propriedades de rigidez e amortecimento das edificações, seja pela forma de adição de dispositivos externos ou pela ação de forças externas, podendo ser classificado como controle passivo, ativo, híbrido ou controle semiativo (AVILA, 2002).

Segundo Gómez (2017), os apregoados, mais simples dispositivos de controle, são os dispositivos de controle passivos, os quais são mais desfrutados na prática em virtude de serem simples para o projeto e execução. Esses são projetados para controlar estruturas que vibrem maioritariamente em um dado modo de vibração. Todavia eles possuem algumas desvantagens, sua principal consiste que se a estrutura for excitada fora da frequência de projeto, os dispositivos passivos perdem sua eficiência. Cabe ainda ressaltar, que se a estrutura for submetida a excitação fora da frequência de projeto, pode-se ainda amplificar a ação sobre a estrutura, piorando a situação a qual era planejada.

Em contrapartida os sistemas de controle ativos não sofrem com essa limitação dada pelo controle passivo, pois os ativos se adaptam as mudanças de parâmetros tanto da estrutura como de carregamento. Entretanto, esse modo de controle apresenta como principais desvantagens: Algoritmos de controle complexos e significativas quantidades de energia nos atuadores para ocorrer a geração das forças de controle.

A combinação entre os sistemas de controle passivos e ativos, geram os sistemas denominados híbridos, o qual apresenta a vantagem de uma diminuição nas forças produzidas pelos atuadores, e abrange uma maior cobertura de faixa de frequências das excitações.

O último ainda não citado, é o sistema de controle semiativos, nos quais não implementam energia ao sistema estrutural sob controle, entretanto suas propriedades podem ser modificadas, se bem controladas, diminuem a resposta do sistema com eficiência.

2.4 Sistemas passivos de controle de movimento

De acordo com os estudos de Constantinou et al. (1998) os sistemas de dissipação de energia e isolamento sísmico se classificam como sistemas de proteção contra terremotos, sendo sua função reduzir os efeitos causados por tais ações. Dessa forma podem ser denominados sistemas de controle de movimento.

Neste texto, serão abordados sucintamente os sistemas passivos de controle, que conforme Constantinou et al. (1998), são uma ampla variedade de materiais e tecnologias com finalidade de melhorar o amortecimento, rigidez e a resistência das estruturas. Conforme apresenta a Tabela 1, na qual de forma simplificativa apresenta a classificação, princípios de operação, materiais, tecnologias, e as performances/objetivos dos sistemas passivos. Ressalta-se que o emprego dos sistemas passivos leva em consideração a frequência de projeto para sua real eficiência. Serão abordados os sistemas passivos em virtude de sua ampla abordagem, entretanto sabemos de sua limitação, a qual se não for atendida, deve- se optar por outro sistema de controle. No qual com o avanço das tecnologias e investimentos na área antissísmica, quando necessário, o controle passivo vem sendo substituído por outros tipos de sistemas de controle.

Classificação	Princípios deoperação	Materiais etecnologias	PerformanceObjetivos
Dispositivos Histeréticos	Rendimento dos metais Fricção	Aço ou chumbo Contato metal-metal ou não-metal	Aumento da força de dissipação de energia
Dispositivos Viscoelásticos	Deformação de viscoelásticos sólidos Deformação de viscoelásticos fluidos Orifício de fluido	Polímeros viscoelásticos Fluido altamente viscoso Fluidos; projeto de orifício avançado e vedação de fluido	Melhoria da rigidez da dissipação de energia
Dispositivos de recentralização	Pressurização de fluido e orifício Ação de mola de fricção Transformação de fase em metal	Fluido compressível, vedação de alta pressão Contato metal-metal ou não-metal Liga com memória de forma, comportamento superelástico	Aumento da força de dissipação de energia, capacidade de recentralização
Absorvedores Dinâmicos de Vibrações	Oscilador de massa sintonizado Oscilador de líquido sintonizado	Amortecedor fluido-massa-mola Tanque de água Recipiente de líquido em forma de U	Aprimoramento do damping

Tabela 1 – Sistemas passivos

Fonte: CONSTANTINOU et al., 1998. Tradução pelo autor.

Como sequência desse trabalho, serão expostos os principais dispositivos dos quais foram supracitados na Tabela 1.

2.4.1 Dispositivos Histeréticos

Por definição, os dispositivos histeréticos são mecanismos que dissipam energia independente da taxa de frequência do carregamento, do número de ciclos da carga e variação de temperatura, incluindo nesse grupo os *Metallic Dampers* e os *Friction Dampers* (CONSTANTINOU et al., 1998).

2.4.1.1 Metallic Dampers

Segundo Falcão Silva *et al.* (2007), esse é um dos mecanismos mais eficazes disponíveis para dissipar a energia fornecida a uma estrutura devidamente planejada durante a ocorrência de uma determinada ação sísmica, por meio da deformação inelástica das substâncias metálicas. Em estruturas de aço tradicionais, o dimensionamento contra a ocorrência dos sismos fundamenta-se sobre a ductilidade procedente dos membros estruturais, de maneira a ocorrer o nível de dissipação necessária. Após o início dos estudos desses dispositivos, foram propostas diversas alterações, incluindo em formato de "X" e de forma triangular. Em relação aos materiais utilizados nestes equipamentos, ocorreram significativas evoluções, observando-se a utilização de chumbo e ligas de "memória de forma". Estes dispositivos são empregados globalmente, como por exemplo no edifício do banco *Wells Fargo*, localizado nos Estados Unidos, na cidade de São Francisco, Califórnia. A Figura 4 exemplifica a aplicação dos *Metallic Dampers* em uma estrutura.

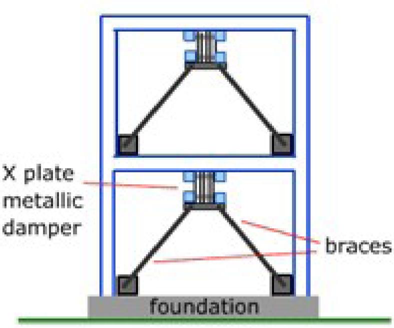


Figura 4 – Ilustração da aplicação dos *Metallic Dampers*, tipo "X" em uma estrutura.

Fonte: <http://www.ideers.bris.ac.uk/resistant/damping_metallic.html>, acesso: 24 de janeiro de 2022

2.4.1.2 Friction Dampers

Neste, a dissipação de energia advinda de um sismo é feita por meio de mecanismos de fricção, sendo que no funcionamento deste é considerado a fricção realizada entre dois corpos sólidos em relação ao movimento de escorregamento entre ambos. Baseado na analogia dos freios, iniciou-se o processo de desenvolvimento dos *Friction Dampers*,

com objetivo de melhorar a resposta sísmica das estruturas (FALCÃO SILVA et al., 2007). Segundo Soong e Dargush (1997), por exemplo foram integrados 32 dispositivos nas estruturas da Biblioteca McConnell na *Concordia University*, localizada no Canadá, em Montreal, conforme apresenta a Figura 5.



Figura 5 – *Friction Damper* utilizado nas estruturas da McConnell em Montreal.

Fonte: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1955.pdf>, acesso: 28 janeiro de 2022.

2.4.2 Dispositivos viscoelásticos

Os dispositivos viscoelásticos comumente são constituídos com a utilização de materiais metálicos com polímeros ou fluido viscoso em seu meio, ocorrendo a dissipação de energia em função do deslocamento elástico do polímero e em virtude da velocidade de deformação (CONSTANTINOU et al., 1998).

2.4.2.1 Viscoelastic Dampers

O uso dos *Viscoelastic Dampers* tem sido eficiente quando o alto amortecimento em baixa frequência é almejado, devido as propriedades desses materiais serem bastante complexas e podem variar com a frequência de excitação (SAMALI; KWOK,1995). Os autores citados anteriormente ainda acrescentam que esse dispositivo pode atuar de duas maneiras: absorvendo ou dissipando energia, ou armazenando-a de maneira elástica.

Segundo Soong e Dargush (1997), o início da aplicação de materiais viscoelásticos para o controle de vibrações ocorreu por volta da década de 50, entretanto sua introdução na engenharia civil ocorreu em 1969, quando foram instalados cerca de 10.000 dispositivos em cada uma das torres gêmeas do *World Trade Center*, em Nova Iorque, devido a sua alta capacidade de absorção de energia. Cita-se também, o emprego desse mecanismo no *Columbia Center Building*, em Seattle, Washington.

2.4.2.2 Viscous Fluid Dampers

De acordo com Harris e Crede (1976), os *Viscous Fluid Dampers* já se encontram

bastantes generalizados, devido a determinados fluidos possuírem características adequadas para dispositivos de proteção passiva. Segundo Constantinou et al. (1998), neste caso a dissipação de energia ocorre em virtude da conversão da energia mecânica em calor à medida que um pistão deforma uma substância altamente viscosa. Este tipo de equipamento tem sido utilizado na engenharia civil de modo a minimizar as ações sísmicas e do vento. Um exemplo da aplicação desse dispositivo ocorreu no *The Arrowhead Regional Medical Center at Colton*, na Califórnia, em cinco edifícios desse complexo, com emprego de 186 dispositivos de capacidade unitária de 145 Toneladas Força, conforme demonstrado na Figura 6.



Figura 6 – Um dos Viscous Fluid Dampers utilizados nas estruturas no *The Arrowhead Regional Medical Center at Colton*, na Califórnia.

Fonte: <http://taylordevices.eu/pdfs/seismic%20applications.pdf>, acesso 25 de janeiro de 2022.

2.4.3 Absorvedores dinâmicos de vibrações

Segundo Martins (2019) esses equipamentos têm por finalidade em modificar as respostas das vibrações de uma estrutura oriundas de excitações, como por exemplo em virtude dos sismos. Dessa forma o dispositivo de controle tem como objetivo evitar vibrações excessivas na estrutura, por meio da sintonização adequada da massa auxiliar que vibra fora de fase com a estrutura primária, ocorrendo a transferência de energia para o dispositivo, reduzindo a resposta do sistema principal. Constantinou et al. (1998) cita dois dispositivos principais: *Tuned Mass Dampers* e os *Tuned Liquid Dampers*, as quais serão

descritos a seguir:

2.4.3.1 Tuned Mass Dampers

Também denominados pela sigla “TMD”, sua aplicação tem como objetivo reduzir a energia ao nível considerado dos elementos da estrutura primária quando solicitados a ação de forças externas, como das ações dos sismos. A maneira de funcionamento deste dispositivo consiste que a redução de energia é acompanhada pela transferência de parte das energias vibracionais ocorridas pelos sismos, serem transferidas para o próprio “TMD”. Sendo ele em sua forma mais comum, consiste em um sistema auxiliar massa-mola-amortecedor acoplado na estrutura principal (SOONG; DARGUSH, 1997). Soma-se a isso, a presença deste dispositivo faz com que a frequência natural da estrutura seja modificada, evitando a ressonância (ROSSATO, 2017). Em Taipei, Taiwan, no edifício denominado Taipei 101, uma estrutura de 101 pisos, utilizou-se o “TMD” em sua estrutura com a finalidade de aliviamento das ações de natureza dinâmica, responsável pelo controle de vibrações oriundas de terremotos de 7° de magnitude na escala Richter e ventos de até 450 km/h (OLIVEIRA, 2012). Dentre suas técnicas de marketing afirma-se que é um edifico resistente a tufões e terremotos. A Figura 7 apresenta uma esquematização da implementação do Tuned Mass Damper no edifício Taipei 101.

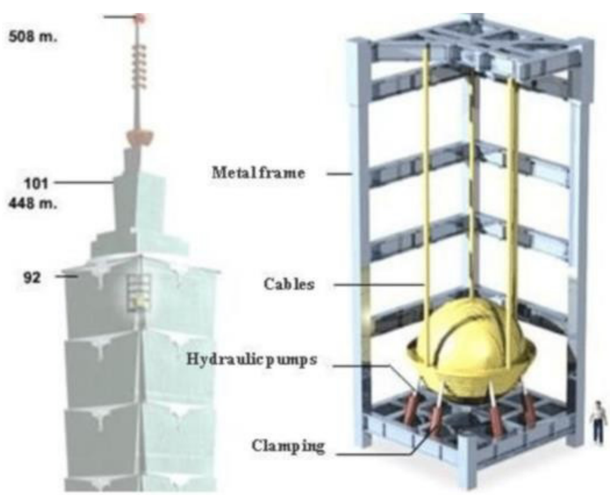


Figura 7 – Representação esquemática da aplicação do “TMD” no edifício Taipei 101, Taiwan.

Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/Damper-in-Taipei-101-building_fig1_323577584>, acesso: 29 de janeiro de 2022.

2.4.3.2 Tuned Liquid Dampers

Neste dispositivo, denominados pela sigla “TLD”, um determinado tipo de líquido é utilizado a fim de fornecer as características necessárias ao sistema secundário, onde nos

Tuned Mass Dampers, era feito pela massa, além disso, comumente a água é utilizada como fluido neste tipo de dispositivo (TAMURA *et al*,1995). Suas primeiras aplicações ocorreram em edifícios localizados no Japão, entretanto os estudos desse tipo de equipamento aplicado em estruturas de engenharia civil iniciaram-se na década de 80 (SOONG; DARGUSH, 1997). Muitos pesquisadores destinaram-se à análise do funcionamento desse dispositivo, desde a utilização de recipientes retangulares completamente preenchido com dois líquidos imiscíveis, com intuito de que a resposta devido a excitação seja absorvida por meio do movimento da interface entre os fluidos (BAUER, 1984). Uma aplicação desse tipo de dispositivo para proteção e controle dos fenômenos causados pela natureza localiza-se no o *Shin Yokohama Prince Hotel* (SYPH), no Japão, onde teve em sua estrutura a implementação dos diversos “TLD” no ano de 1995 (TAMURA *et al*., 1995). A Figura 8 descreve a implementação desse dispositivo no SYPH.

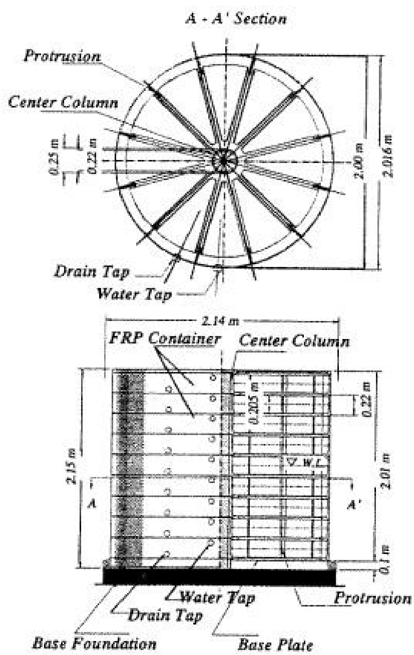


Figura 8 – Descrição dos “TLDs” instalados no edifício SYPH, Yokohama, Japão.

Fonte: TAMURA *et al*., 1995.

2.5 Materiais inteligentes

De acordo com Soong e Dargush (1997), composto entre as tecnologias de controle passivas e ativas em estruturas, uma área em desenvolvimento aborda o uso de materiais inovadores, também denominados “inteligentes”, os quais fornecem um meio alternativo e com potencial atrativo de dissipação de energia em sistemas estruturais, neste artigo,

são brevemente descritos como membros potenciais de uma família de dispositivos de dissipação de energia. Segundo o livro *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, de Soong e Dargush (1997), os materiais mais relevantes que foram analisados como dispositivos de atuação são ligas com memória de forma, elementos piezoelétricos, fluidos eletro-reológicos e mais recentemente fluidos magneto-reológicos.

Todavia, as maiores pesquisas nesta área ocorrem em aplicações de estruturas aeroespaciais e sistemas mecânicos, embora tenha grande potencial de aplicação no controle do movimento de edificações contra cargas ambientais, todavia, permanentemente seja avaliada do ponto de vista de custos e viabilidade técnica.

3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista que a ocorrência dos sismos é um fenômeno que quando natural é inevitável, as estruturas como edifícios localizados em zonas de alta sismicidade devem ser projetados levando em consideração as ações externas que estes poderão sofrer ao longo do tempo, ou até mesmo em edifícios já construídos, com a implementação de sistemas de proteção antissísmica visando a segurança estrutural e populacional deles. Soma-se a isso, com o avanço dos estudos e da tecnologia na área sísmica, a engenharia tem como responsabilidade implementar sistemas que minimizam os efeitos causados pelas ações sísmicas. Entretanto como podemos ver, essa visão protetiva devido a ocorrência deste fenômeno tem sido expandida pelo mundo, mas aplicada majoritariamente em países desenvolvidos, não abrangendo localidades que são vulneráveis à ação sísmica devido a sua localização, ocasionando rastros de destruição em países menos desenvolvidos como no Haiti.

O estudo do comportamento da ação dinâmica dos sismos é de essencial importância, devendo ser abrangida nos cursos de engenharia de uma maneira integral, como modo de proporcionar ao mercado engenheiros mais capacitados. Além disso, com a implantação de dispositivos auxiliares tem trazido boas respostas das estruturas quando submetidas as ações sísmicas, como exemplo disso, vemos o Japão, localidade onde ocorrem terremotos com maior frequência, entretanto os danos causados não são tão grandiosos como em países menos desenvolvidos. Por outro lado, a implementação de sistemas passivos tem as suas restrições em virtude da frequência de projeto, onde após estudos históricos sobre as ocorrências sísmicas pode-se optar por outro tipo de sistema.

Em suma, a evolução teórica e tecnológica de sistemas de proteção sísmica está em ascensão, proporcionando novos dispositivos auxiliares e técnicas de proteção estrutural, com a finalidade de reduzir os desastres causados pelos tremores de terra. Cabe ainda salientar, que mesmo abrangido por vários autores da literatura, o uso de amortecedores em decorrência dos efeitos sísmicos pode ser ineficiente para obter a resposta necessária da estrutura, tendo em vista que o uso inadequado de fatores de amortecimento poderá

amplificar consideravelmente a força transmitida da base para a estrutura.

AGRADECIMENTOS

O autor T.M. Claudino agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

ASSUMPÇÃO, M. S.; DIAS NETO, C. M. Sismicidade e estrutura interna da terra. In: **Decifrando a terra**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, p. 43-62, 2000.

AVILA, S. M. **Controle híbrido para atenuação de vibrações em edifícios**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

BAUER, H.F. New proposed dynamic absorbers for excited structures. In: **Vibration Damping Workshop Proceedings**. ed. Lynn Rogers. p. DD1-DD27, Ohio, 1984.

BOLT, B. A. **Terremotos**. 1. ed. Barcelona: Reverté, 2003.

BRANDÃO, F. S. **Otimização de atenuadores dinâmicos sincronizados para o controle de vibrações em edifícios submetidos à excitação sísmica**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. 3. ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc., 2003.

CONSTANTINOU. M. C, SOONG, T. T., DARGUSH, G. F. **Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering**, 1. ed. Nova Iorque: Research Foundation of the State University of New York,1998.

FALCÃO SILVA, M. J.; COSTA, A. C., COELHO, E. Sistemas de protecção sísmica e sua aplicabilidade a Portugal. In: **7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica**, Porto: Livro de Atas de Conferência Nacional, 2007.

GÓMEZ, A. L. Z. **Controle de vibrações em edifícios submetidos à ação de cargas dinâmicas utilizando amortecedor de massa sintonizado na forma de pêndulo**. 2007. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

HARRIS, C. M., CREDE, C.E. **Shock and Vibration Handbook**, 2. ed. Nova Iorque: McGraw Hill, 1976.

MARTINS, J. F. **Estudo analítico-experimental de parâmetros ótimos para o controle passivo via absorvedor de vibrações do tipo coluna líquida sintonizada em estruturas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais de Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

OLIVEIRA, F. S. **Critérios de projeto para amortecedor tipo pêndulo para controle de vibrações em edifícios altos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

OS 10 terremotos mais potentes e com maior número de mortos da história da América Latina. **BBC NEWS BRASIL**, 24 set. 2017. Disponível em: < https://www.bbc.com/portuguese/internacional-41380495>. Acesso em: 18 jan. de 2022.

PEÑA, L. A. P. **Análise dos efeitos provocados por abalos sísmicos em estruturas irregulares**. 2012. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

REIS, E. PRAVIA, Z. M. C. Avaliação sísmica de um edifício de múltiplos andares em aço. In: **Congresso Latinoamericamo da Construção Metálica – CONSTRUMETAL 2012**, São Paulo: Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM), 2012.

ROSSATO, L. V. **Otimização de amortecedores de massa sintonizados em estruturas submetidas a um processo estacionário**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SAMALI, B., KWOK, K. C. S. Use of viscoelastic dampers in reducing wind - and earthquake-induced motion of building structures. In: **Engineering Strutures**, v. 17, n. 9, p.639-654,1995.

SANTOS, B. V. **Análise de Estruturas Sujeitas a Ação de Sismos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe, Aracaju, 2021.

SOONG, T. T., DARGUSH, G. F. **Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit**, 1. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons,1997.

TAMURA, Y., OHTSUKI, T., WAKAHARA, T., KOHSAKA, R. Effectivenes of tunel liquid damper under wind excitation. In: **Engineering Strutures**, v. 17, n. 9, p.609- 621,1995.

TREIN, C. A. **Modelagem dinâmica equivalente de edifícios altos submetidos** à **ação do vento**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CAPÍTULO 7

AVALIAÇÃO ANALÍTICA ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DO CHUVEIRO ELÉTRICO

Data de aceite: 02/01/2023

Haypha Mendes Vieira
Universidade Federal da Grande Dourados
Dourados – MS

Carlos Alberto Chuba Machado
Universidade Federal da Grande Dourados
Dourados – MS

Fernando Augusto Alves Mendes
Universidade Federal da Grande Dourados
Dourados – MS

RESUMO: Considerando o chuveiro elétrico como um dos grandes consumidores de energia elétrica na classe residencial no Brasil, esse trabalho apresenta uma análise mais detalhada das ineficiências que envolvem o seu funcionamento. Por meio da reprodução de ensaios teóricos embasados nas normas NBR 15001, NBR 12087 e NBR 12089 aplicou-se as equações de balanço de energia e exergia para duas situações hipotéticas de funcionamento do chuveiro. Na primeira considerou-se que toda a energia entregue ao chuveiro é transferida para a água sem a formação de vapor, que sai exclusivamente na forma de água aquecida. Dentro dessas condições de funcionamento, determinou-se que a Eficiência de Segunda Lei (η_{II}) do chuveiro elétrico é de apenas 1,59%, o que indica que a maior parte da potência aplicada no aparelho destina-se à exergia destruida (X_{dest}). Já na segunda situação considerou-se que parte da água de saída estivesse sob forma de vapor saturado, simulando uma ocorrência prática inevitável. Sob essas condições, constatou-se que a uma vazão média de 0,3 L/s, a Eficiência de Segunda Lei (η_{II}) é de 11,64% para uma taxa de geração de vapor de 2% da vazão mássica de entrada, valor que sobe para 17,32% para uma taxa de geração de vapor de 10%. A contribuição da formação de vapor na destruição de exergia total do sistema também aumentou sendo de aproximadamente 50% para 2% de geração de vapor e 85% para 10% de geração de vapor. Por último analisou-se a destruição de exergia que ocorre na própria resistência elétrica de acordo com sua temperatura de funcionamento. Constatou-se que à medida em que é aumentada a temperatura de funcionamento da resistência elétrica, menor é a destruição de exergia que ecorre nela mesma.

PALAVRAS-CHAVE: Chuveiro elétrico,

Eficiência, Exergia.

ENERGETIC AND EXERGETIC ANALYTICS EVALUATION OF ELECTRIC SHOWER

ABSTRACT: Considering the electric shower as one of the major consumers of electric energy in the residential class in Brazil, this work presents a more detailed analysis of the inefficiencies that involve its operation. Through the reproduction of theoretical tests based on the NBR 15001, NBR 12087 and NBR 12089 standards, the energetic balance and exergetic equations were used for application in two hypothetical situations of shower operation. In the first, it was considered that all the energy delivered to the shower is transferred to the water, which comes out exclusively in the form of heated water. Within these specifications, it was determined that the efficiency of the Second Law (η_{II}) of the electric shower is average 1.59%, which indicates that most of the power applied in the device is destined for the destruction of exergy (X_{dest}). In the second situation, part of the outlet water was considered to be in the form of saturated steam, simulating an inevitable practical occurrence. Under these conditions, it was found that at an average flow rate of 0.3 L / s, the Second Law Efficiency (η_{II}) is 11.64% for a steam generation rate of 2% of the incoming mass flow, value that rises to 17.32% for a steam generation rate of 10%. The contribution of the steam to the system's total exergy destruction also increased from approximately 50% to 2% of steam generation and 85% to 10% of steam generation. Finally, the exergy destruction that occurs in the electrical resistance itself was analyzed according to its operating temperature. It was found that the higher the operating temperature of the electrical resistance, the lower the exergy destruction.
KEYWORDS: Electric Shower, Efficiency, Exergy.

1 I INTRODUÇÃO

A invenção do chuveiro elétrico representou um avanço na qualidade de vida e higiene dos brasileiros. Apesar de sua construção e funcionamento serem considerados simples, sua adoção foi uma alternativa aos tradicionais aquecedores a gás, amplamente utilizados em outros países. Sua vantagem está em não necessitar de instalação de canalização de gás e ainda aproveitar o sistema elétrico já disponível e em ascensão no país em meados de 1930, o que o tornou mais viável economicamente.

Com a popularização do plástico nas décadas de 1960 e 1970, o emprego desse material nos chuveiros o tornou mais seguro, aumentando a isolação dos condutores elétricos em seu interior. Mesmo com diferentes modificações estéticas e funcionais, agregando novas tecnologias de controle de temperatura e pressurização de água, a eficiência do chuveiro é algo que segue praticamente inalterado desde a sua concepção, uma vez que seu funcionamento continua o mesmo.

Em resposta ao aumento da demanda energética, o Brasil promulgou a Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001, conhecida como Lei de Eficiência Energética, que estabelece níveis mínimos de eficiência energética a aparelhos consumidores de energia

fabricados ou comercializados no país em várias modalidades. Ela foi um dos principais componentes do marco legal da política de eficiência energética no país, constituindo-se num instrumento eficaz e efetivo de política pública e planejamento energético. Todavia, mesmo estabelecendo critérios a diversos equipamentos, o chuveiro elétrico não obteve uma regulamentação específica para definição de seus padrões de eficiência. Tal fato pode ser justificado devido à eficiência de Primeira Lei ser superior a 95% (INMETRO,2008), considerando-se apenas a razão entre a energia térmica de saída e a elétrica de entrada. O processo de cálculo dessa eficiência é normatizado pela NBR 15001:2003.

ELETROBRAS (2007) em sua pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso apresentou dados relativos ao aquecimento de água, principalmente para banho. O trabalho conclui que devido à frequente utilização e às altas potências de funcionamento dos equipamentos destinados a essa atividade, o setor de aquecimento de água é considerado de grande importância para ações de políticas direcionadas à eficiência energética. De acordo com os dados divulgados, 80,9 % dos domicílios brasileiros aquecem a água para banho de alguma forma. Desses, 73,5 % eram sistemas que utilizavam a energia elétrica para o aquecimento da água.

Dada a magnitude da parcela de domicílios que utilizam o aquecimento por resistência elétrica, mesmo apresentando um rendimento térmico elevado, existe a necessidade de análise sob a perspectiva da qualidade do aproveitamento energético empregado nesse processo.

A exergia surgiu baseada na Segunda Lei da Termodinâmica e tem sido ignorada no planejamento de sistemas elétricos. Acredita-se que isso se deve, principalmente, à falta de familiaridade com o segundo princípio da termodinâmica e às implicações decorrentes para avaliação precisa. Há fatores que não se encontram totalmente disponíveis no mercado e precisam ser estudados, fatores tecnológicos de conversão da energia, informações sobre o uso final da energia, razões políticas e nível de conscientização sobre o segundo princípio da termodinâmica, bem como suas implicações no planejamento sobre diversas esferas de decisão da sociedade, na tecnologia disponível, eficiência dos equipamentos, hábitos de consumo e etc. (Oliveira filho, 2000).

A importância de se analisar a exergia em processos de aquecimento em chuveiros elétricos está no fato de evidenciar o desperdício do potencial associado à eletricidade, energia considerada de maior qualidade e “densidade”. Em processos de transformação de energia a capacidade de realizar trabalho diminui; portanto, à medida que é transformada a energia, há a geração de irreversibilidade (Brzustowski & Golem, 1977). Por mais que o processo de transformação de energia seja inevitável para a utilização dos diversos equipamentos eletrônicos, em um processo em que se faz o aquecimento de água à baixa temperatura, a destruição de exergia corresponde a quase toda a capacidade de realização de trabalho.

Além da análise exergética, propõe-se também uma investigação mais criteriosa

sobre os produtos gerados nesse tipo de aquecimento. Ao utilizar o chuveiro, é comum observar vapor ao seu redor bem como a formação de água condensada em espelhos e superfícies mais afastadas. Essa água na forma de vapor é responsável por utilizar parte da energia empregada para aquecimento da água do banho, porém representa um produto indesejável no processo. Considerando que o calor necessário para a mudança de fase da água é mais de 50 vezes maior que o calor necessário para simplesmente aquecê-la em 10ºC (Shapiro et al, 2005), faz-se necessário que haja estudos e desenvolvimento de tecnologias que tornem o aquecimento de água cada vez mais eficiente, analisando não somente a transferência de calor para aquecimento da água, mas também a redução de efeitos que geram perdas na forma de vapor e perda de calor através de sua carcaça.

2 I FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A normatização de procedimentos envolvendo estudos de fenômenos térmicos é fundamental para estabelecer os parâmetros de ensaio e considerações associadas à análise. Qualquer fator como umidade, temperatura ambiente, incidência solar ou disposição de sensores de medição podem influenciar nos resultados obtidos. Nesse sentido, a fim de padronizar o estudo de caso, foram adotados procedimentos e condições de análise de acordo com a norma NBR 15001:2003 - Aparelho eletrodoméstico fixo de aquecimento instantâneo de água - Determinação da eficiência energética. Essa Norma especifica um método para determinação da eficiência energética, referida à tensão nominal e à potência elétrica máxima disponível em aparelhos eletrodomésticos fixos de aquecimento instantâneo de água, em particular aos chuveiros elétricos ou duchas elétricas, aquecedores instantâneos de água e torneiras elétricas destinados ao aquecimento da água à temperatura abaixo do seu ponto de ebulição. (ABNT, 2003)

Para a medição da eficiência do chuveiro é utilizado um recipiente coletor de acordo com a Fig. 1.

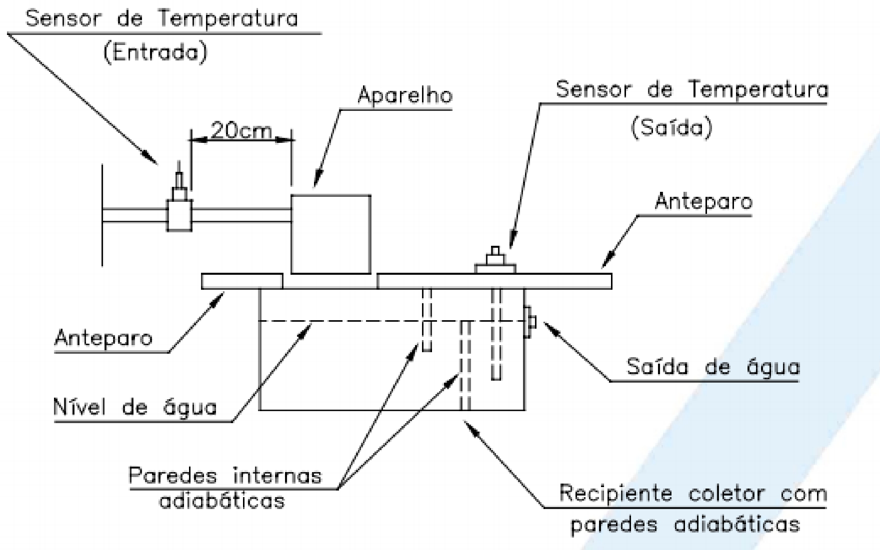


Figura 1 – Esquema do recipiente coletor

Fonte: ABNT – NBR 15001:2003

A instalação deve ter capacidade de fornecer água em escoamento forçado, regime permanente, vazão de no máximo 0,5 L/s e pressão de no máximo 100 kPa. O ambiente de ensaio deve ter temperatura de 22ºC±3ºC e umidade de 65%±10%. O procedimento para a obtenção da eficiência energética, segundo a norma, consiste em regular a vazão de água para 0,05 L/s e acionar o dispositivo de aquecimento. Após 5 minutos de funcionamento iniciam-se as medições de temperatura para garantir que a medição ocorra em regime permanente. É importante assegurar-se que a temperatura de saída da água não ultrapasse 40ºC, mesmo que seja necessária a manutenção da vazão até que essa temperatura seja de 38ºC±2ºC. Após 3 min de funcionamento do aparelho com vazão e temperaturas estabilizadas, inicia-se a leitura da temperatura de entrada da água (T_e), temperatura de saída da água (T_s), tensão (E) e corrente elétrica (I). Tendo posse de todos os dados coletados, juntamente com a vazão é possível determinar a eficiência energética do dispositivo aquecedor de água.

O processo de determinação da eficiência é repetido três vezes consecutivas com intervalos de 1 minuto entre as medições, de forma a se obter a média aritmética dos resultados em porcentagem e com pelo menos 2 algarismos significativos. A Norma ainda estabelece que para estar em conformidade com ela, o aparelho ensaiado precisa obter valor de eficiência superior a 95%.

Outras normas utilizadas na fundamentação desse trabalho foram a NBR 12087:2015, que trata da determinação da potência elétrica de chuveiros e NBR 12089, a respeito do método de determinação do consumo energético desses aparelhos.

A NBR 12087:2015 estabelece, dentro dos mesmos parâmetros de ensaio de todas as demais normas citadas, a potência elétrica alcançada pelo dispositivo em análise por meio da medição de tensão e corrente elétrica, utilizando um processo de ensaio idêntico ao descrito anteriormente, porém por meio de uma outra equação que também leva em consideração o fator de potência do sistema.

Já a NBR 12089:2015 determina o método de constatação de consumo mensal mínimo e máximo na utilização de um chuveiro elétrico. A aferição da condição de consumo mínimo é feita considerando um banho diário com duração média de 8 minutos, ao longo de 30 dias, regulando um incremento de temperatura da água de 10º C, em média, com vazão igual ou superior a 0,05 L/s. Na categoria de consumo máximo, a análise é feita com base em um banho diário de 8 minutos com vazão de 0,05 L/s, por 30 dias e regulação do dispositivo para aquecer ao máximo a água.

3 I METODOLOGIA

Para a realização da análise energética e exergética do chuveiro elétrico, inicialmente, foram levantadas as normas e equações que regem o sistema, bem como bibliografias que o envolvem para que fossem determinadas suas condições normais de funcionamento. Considerou-se 2 diferentes situações de funcionamento. A primeira define que toda a energia elétrica entregue pela resistência é aproveitada exclusivamente para aquecimento da água, sem geração nenhuma de vapor. Já a segunda situação define que durante o funcionamento do chuveiro, parte da água aquecida sai do volume de controle na forma de vapor e parte na forma de água aquecida. Foram elaboradas representações do volume de controle (VC) do sistema a ser considerado nas duas situações e descritas as equações que regem cada modelo proposto. Em todas as situações considerou-se a pressão da água como 100 kPa em conformidade com as normas de referência. Para efeitos de estudo, foram desconsideradas as condições de umidade e evaporações relacionadas ao ambiente.

Por último, foram analisadas as destruições de exergia apenas na resistência elétrica à diferentes temperaturas de funcionamento. As equações descritas a seguir foram inseridas no programa EES – Engineering Equation Solver (S.A. Klein), o qual já possui em seu banco de dados, todos os valores das tabelas termodinâmicas necessários para o estudo.

3.1 Situação 1 – Sem geração de vapor

Em um primeiro momento, foram feitos os cálculos sem imposição de limite de potência de entrada, onde foram definidas apenas as condições de saída de água, a fim de correlacionar os dados de eficiência energética e exergética às condições teóricas de potência requerida para elevação de temperatura da água em 10 ºC.

A Figura 2 representa o volume de controle e todas as variáveis consideradas para a situação 1.

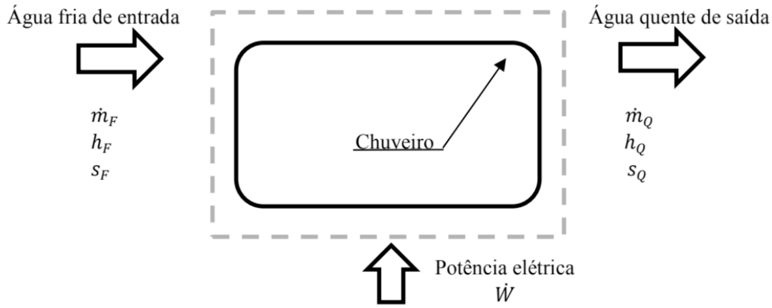


Figura 2 – Volume de controle do chuveiro sem geração de vapor

Fonte: Própria

Onde T_F é a temperatura de entrada da água no chuveiro (ºC), T_Q é a temperatura de saída da água (ºC), $\dot{m}_F$ é a vazão mássica de água fria (kg/s), $\dot{W}_Q$ é a vazão mássica de água quente (kg/s) e é a potência elétrica fornecida ao chuveiro (kW).

As equações de conservação da massa e da energia para o presente caso são apresentadas pelas Eqs. (1) e (2), respectivamente. Foram desprezados os termos que representam a variação de energia cinética e potencial. Na situação em que ocorre o processo de aquecimento da água no estado líquido sem mudança de fase a Eq. (3), obtida a partir da Eq. (2), pode ser usada para determinação da potência de aquecimento da água. A Eq. (4) corresponde ao balanço exergético aplicado no V.C. (Çengel; Boles,2013).

$$\dot{m}_F = \dot{m}_Q = \dot{m} = \rho.\dot{V} \tag{1}$$

$$-\dot{W} = \dot{m} * \left(h_Q - h_F\right) \tag{2}$$

$$\dot{W} = \dot{m}.c_P.\Delta T \tag{3}$$

$$-\dot{W} + \dot{m}.[(h_e - h_s) - T_0.(s_e - s_s)] - \dot{X}_{dest} = 0 \tag{4}$$

Onde $\dot{m}$ refere-se à vazão mássica de água (kg/s), $\dot{V}$ é a vazão volumétrica (m³/s), ρ é a massa específica da água (kg/m³), $\dot{W}$ é a potência elétrica (kW), *h* representa entalpia da água (kJ/kg), c_p é o calor específico da água à pressão constante (kJ/kg.ºC), ΔT é o incremento de temperatura da água entre a entrada e a saída (ºC), T_0 é a temperatura de estado morto (K), s é a entropia da água (kJ/kg.K) e $\dot{X}_{dest}$ corresponde à exergia destruída (kW). Os subscritos F e Q correspondem à água fria e água quente, respectivamente. Na Eq. (4) o subscrito *e* representa o estado de entrada e o subscrito *s* o estado de saída do volume de controle.

O trabalho reversível pôde ser determinado por meio da Eq. (5) e a eficiência

exergética, também chamada de eficiência de Segunda Lei, por meio da Eq. (6)

$$\dot{W}_{rev1} = \dot{m}.\left[(c_P.\Delta T) - T_0 * c_P.Ln\left(\frac{T_F}{T_Q}\right)\right] \quad (5)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{rev1}}{\dot{W}} \quad (6)$$

Onde $\dot{W}_{rev1}$ corresponde ao trabalho reversível do processo de aquecimento da água na situação 1 (kW).

3.2 Situação 2 – Com geração de vapor

Inicialmente, buscou-se encontrar o potencial da geração de vapor de um chuveiro comum, estabelecendo a potência usual máxima de entrada de 5,5 kW e definindo o quanto de vapor, em porcentagem de vazão mássica de entrada, poderia ser gerado com a energia excedente à usada para aquecer a água em 10º C.

Após isso, foi considerado que uma parcela de água que entra no chuveiro absorve energia térmica suficiente para sair na forma de vapor saturado. O volume de controle para essa situação passa a ser como mostrado na Fig. 3.

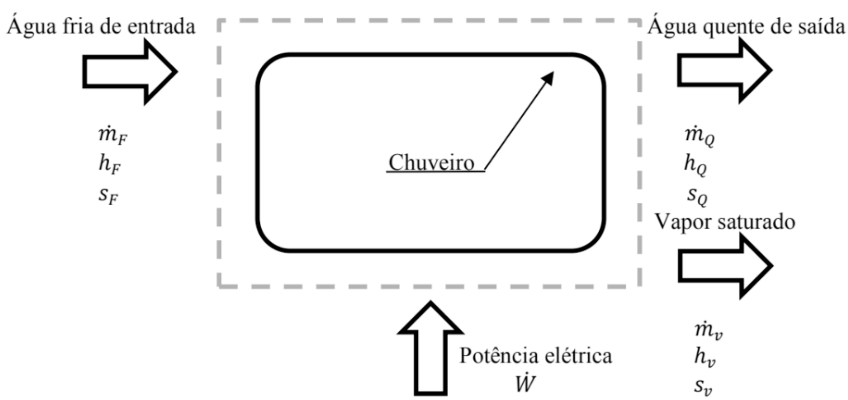


Figura 3 – Volume de controle do chuveiro com geração de vapor

Fonte: Própria

Onde $\dot{m}_F$ é a vazão mássica de água fria que entra no chuveiro (kg/s), $\dot{m}_Q$ é a vazão mássica de água quente que sai (kg/s), $\dot{W}$ é o trabalho elétrico (W) $\dot{m}_v$ e é a vazão mássica de vapor que sai do volume de controle (kg/s).

De forma análoga à situação 1, também foram aplicadas as equações termodinâmicas que regem o sistema, respeitando os conceitos conservação de massa e energia que resultaram nas Eqs. (7), (8) e (9).

$$\dot{m}_F = \dot{m}_Q + \dot{m}_v \quad (7)$$

$$\dot{m}_v = a.\dot{m}_F \tag{8}$$

$$-\dot{W} = \dot{m}_F.h_F - \dot{m}_Q.h_Q - \dot{m}_v.h_v \tag{9}$$

Onde α representa a fração da água de entrada que é transformada em vapor saturado (%) e o subscrito *v* refere-se ao vapor saturado que sai do volume de controle.

Considerando que a utilidade do chuveiro elétrico se dá apenas pela água aquecida, calculou-se a eficiência prática do aparelho η (%), levando em conta a parcela de energia gasta para elevação de temperatura da água representada por $\dot{Q}_Q$ (kW) e desprezando a parcela perdida na forma de vapor. As Eqs. (10) e (11) descrevem essa análise.

$$\dot{Q}_Q = \dot{m}_F.(1-a).c_P.\Delta T \tag{10}$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_Q}{\dot{W}} \tag{11}$$

Para a análise exergética e cálculo da eficiência de Segunda Lei, foram usadas as Eqs. (12) e (13)

$$-\dot{W}_{rev} + \dot{m}_F.[(h_F - h_0) - T_0.(s_F - s_0)] - \dot{m}_Q.[(h_Q - h_0) - T_0.(s_Q - s_0)] - \dot{m}_v.[(h_v - h_0) - T_0.(s_v - s_0)] = 0 \tag{12}$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{rev2}}{\dot{W}} \tag{13}$$

Onde $\dot{W}_{rev2}$ é o trabalho reversível para aquecimento da água (kW) na situação 2 e s_0 é a entropia da água em estado morto.

Após a inserção do equacionamento no *software* EES, foram definidos diferentes valores de taxa geração de vapor a fim de se analisar o impacto da mesma no consumo e eficiência geral do sistema. Foram definidas taxas de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Isso pôde ser feito apenas alterando o coeficiente α da Eq. (8).

3.3 Destruição de exergia na resistência elétrica

A última análise realizada buscou saber o quanto da destruição de exergia ocorre na própria resistência elétrica, selecionando-a como volume de controle e objeto de estudo. Foram usadas as Eqs. (14) e (15) e temperaturas teóricas da superfície da resistência, de 22º C até 1000º C. O limite superior de temperatura corresponde ao valor típico de funcionamento de aquecedores dessa modalidade. (SILVEIRA, 2013).

$$\dot{S}_{ger} = \frac{Q}{T_{sup}} \tag{14}$$

$$\dot{X}_{destR} = \dot{S}_{ger}.T_0 \tag{15}$$

Sendo $\dot{S}_{ger}$ a entropia gerada na resistência (kW/K), Q o calor dissipado (kW) e T_{sup} a temperatura na superfície da resistência (K). $\dot{X}_{destR}$ é a exergia destruída na resistência (kW).

Foram calculados diferentes valores de exergia destruída de acordo com as potências requeridas para aquecimento da água em 10 ºC em cada uma das vazões descritas na situação 1 até o valor de 5,5 kW, desconsiderando a energia excedente que supostamente

se torna vapor. Dentro dessas condições, foram comparadas as destruições de exergia que ocorre na resistência e a total do sistema.

4 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Situação 1 – Sem geração de vapor

Utilizando-se as condições de temperatura ambiente definidas pela norma 15001:2003, obteve-se os resultados descritos na Tab. 1 com o incremento de temperatura da água (ΔT) de 10ºC.

É possível observar que a parcela de exergia destruída representa quase que inteiramente toda a energia conferida ao sistema de aquecimento. O quociente entre o trabalho reversível e o trabalho total (Eq. 6) fornece uma eficiência de Segunda Lei média igual a 1,59%.

Percebe-se também que a potência requerida à vazão máxima é de 20,86 kW, valor muito superior à potência máxima encontrada nos chuveiros mais comuns de 5,5 kW. Isso significa que, teoricamente, a partir da vazão entre 0,1 L/s e 0,15 L/s o chuveiro torna-se incapaz de aquecer toda a água em 10ºC.

$\dot{V}$ (L/s)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{W}_{rev}$ (kW)	$\dot{X}_{dest}$ (kW)
0,05	-2,09	-0,03	2,05
0,10	-4,17	-0,07	4,11
0,15	-6,26	-0,10	6,16
0,20	-8,34	-0,13	8,21
0,25	-10,43	-0,17	10,26
0,30	-12,52	-0,20	12,32
0,35	-14,60	-0,23	14,37
0,40	-16,69	-0,27	16,42
0,45	-18,77	-0,30	18,47
0,50	-20,86	-0,33	20,53

Tabela 1. Resultados teóricos para aquecimento de água sem geração de vapor.

4.2 Situação 2 – Com geração de vapor

Por meio da Tabela 2 é possível analisar o potencial hipotético de geração de vapor com a energia excedente à utilizada para aquecer a água em 10º C em chuveiros que fornecem 5,5 kW de potência. $\dot{W}_{nec}$ representa a potência necessária para aquecer a água em determinada vazão e $\dot{W}_{exced}$, a potência que sobraria para a formação de vapor que é

expressa na fração de vapor como sendo uma porcentagem da vazão de entrada.

$\dot{V}$ (L/s)	$\dot{W}_{nec}$ (kW)	$\dot{W}_{exced}$ (kW)	**Fração de vapor (%)**
0,05	-2,09	-3,41	2,65%
0,06	-2,50	-3,00	1,94%
0,07	-2,92	-2,58	1,43%
0,08	-3,34	-2,16	1,05%
0,09	-3,75	-1,75	0,75%
0,10	-4,17	-1,33	0,52%
0,11	-4,59	-0,91	0,32%
0,12	-5,01	-0,49	0,16%
0,13	-5,42	-0,08	0,02%

Tabela 2. Resultados teóricos de potencial de geração de vapor.

Na prática, tal situação não se concretizaria, pois, a energia excedente seria diluída na parcela destinada ao aquecimento de água, o que representaria um aumento de temperatura da água além dos 10ºC. Todavia, a Tab. 2 fornece a informação de que a medida em que se diminui a vazão de água, o percentual hipotético de geração de vapor é aumentado. Isso pode ser comprovado de maneira experimental ao tomar banho e reduzir ao mínimo a vazão, de forma que o chuveiro permaneça ligado. É possível perceber que rapidamente são formados condensados em superfícies de vidro e espelhos do ambiente devido ao aumento da umidade no ar.

Partindo do pressuposto de que a formação de vapor seja inevitável, os cálculos de eficiência (η) de acordo com as Eqs. (10) e (11) foram realizados para cada taxa de geração de vapor como pode ser visto na Tab. 3. É notório o impacto que o vapor tem na energia útil do chuveiro elétrico, uma vez que uma fração de 2% de vapor no sistema já é responsável por utilizar mais da metade de toda a energia provida.

Fração de vapor (%)	**η (%)**
2	44,23
4	27,98
6	20,23
8	15,69
10	12,72

Tabela 3. Resultados teóricos de eficiência prática do chuveiro elétrico.

A Tabela 4 demonstra como se daria o balanço exergético especificamente para a geração de 2% de vapor.

$\dot{V}$ (L/s)	$\dot{W}$ (kW)	$\dot{W}_{rev}$ (kW)	$\dot{X}_{dest}$ (kW)
0,05	-4,62	-0,54	4,08
0,1	-9,24	-1,08	8,17
0,15	-13,86	-1,61	12,25
0,2	-18,48	-2,15	16,33
0,25	-23,11	-2,69	20,42
0,3	-27,73	-3,23	24,50
0,35	-32,35	-3,77	28,58
0,4	-36,97	-4,30	32,67
0,45	-41,59	-4,84	36,75
0,5	-46,21	-5,38	40,83

Tabela 4. Resultados teóricos para aquecimento de água com 2% de geração de vapor.

Ao se comparar os resultados de potência ($\dot{W}$) das Tabs. 1 e 4 é possível inferir que a formação de vapor, mesmo em pequena quantidade (2%) tem impacto substancial na potência necessária para funcionamento do chuveiro. Um fator relevante é que a parcela de trabalho reversível ($\dot{W}_{rev}$) aumenta consideravelmente quando se tem o vapor saturado.

De forma análoga, os resultados para outras taxas de geração de vapor podem ser analisados e comparados na Fig. 4 abaixo. Para efeito de comparação, foram apresentados os valores correspondentes à vazão média de 0,3 L/s.

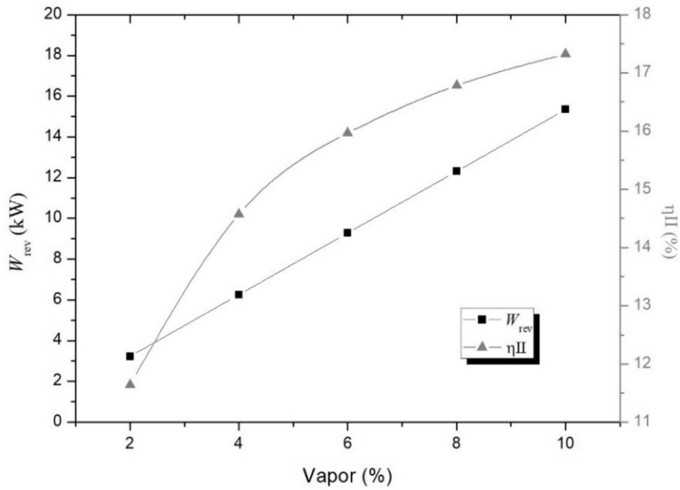


Figura 4 –Trabalho reversível e Eficiência de Segunda Lei entre diferentes taxas de geração de vapor à vazão de 0,3 L/s

Fonte: Própria

É interessante ressaltar a inconstância da Eficiência de Segunda Lei (η_{II}) entre os diferentes valores de geração de vapor. Enquanto para baixas formações de vapor, seu incremento representa uma maior variação na eficiência, para altas formações o mesmo não ocorre, formando uma curva ascendente que tende a se manter constante. Isso pode se dar devido à enorme discrepância entre os valores de calor latente e calor sensível às condições de ensaio. Quando uma pequena quantidade de vapor é formada, proporcionalmente sua energia e entropia podem representar um alto impacto no sistema como um todo. Todavia, se o sistema já possui uma maior formação de vapor, qualquer incremento não representa impacto tão significante.

Fica evidente que a formação de vapor resulta em um aumento de η_{II}, o que pode ser assinalado como maléfico para um equipamento como o chuveiro elétrico que não tem como objetivo a geração de trabalho (W). Além disso, esse aumento se dá pela consideração do vapor como parte do sistema, porém o mesmo é dispensado no ambiente como produto indesejável. Como foi visto na Situação 1, as condições ideais de funcionamento para o eletrodoméstico apresentam uma Eficiência de Segunda Lei baixa.

Enquanto a Fig. 4 apresenta um aumento de η_{II} conforme aumenta-se a porcentagem de vapor, a Fig. 5, mostra que juntamente com η_{II} há também o aumento da contribuição do vapor na $\dot{X}_{dest}$ total do sistema.

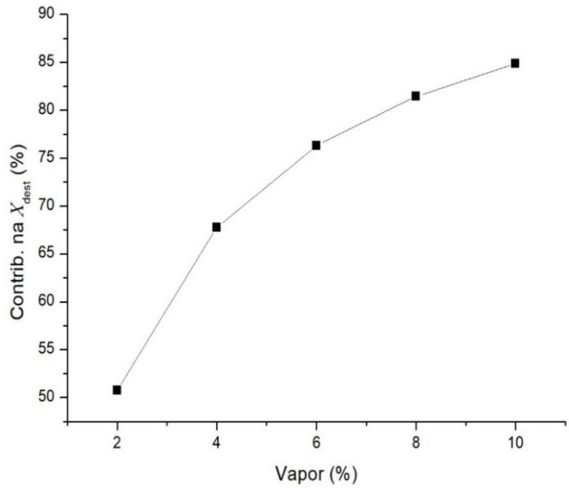


Figura 5 – Contribuição da formação de vapor na exergia destruída total do sistema.

Fonte: Própria

4.3 Exergia destruída na resistência elétrica

Ao analisar somente a resistência elétrica como volume de controle, onde a potência elétrica é transformada em energia térmica, foi possível estabelecer a relação entre a geração de entropia e, consequentemente, a exergia destruída com a temperatura de operação da resistência como pode ser observado na Fig. 6.

Pode-se perceber que para ambas as vazões o comportamento da curva é semelhante, sendo a destruição da exergia maior em baixas temperaturas de funcionamento da resistência, diminuindo à medida em que se atinge a temperatura de 1000 ºC. Considerando que a temperatura da resistência depende de diversos aspectos construtivos do chuveiro relacionados à sua transferência de calor, potência aplicada e vazão de água, os pontos da Fig. 6 representam uma gama de valores possíveis. A representação de apenas duas vazões se deu por conta da ultrapassagem da potência requerida para aquecimento da água em 10 ºC da potência máxima comum em chuveiros elétricos comerciais (5,5 kW), como pode ser observado na Tab. 1.

Supondo que à essas vazões a resistência elétrica funcione em uma faixa de temperatura próxima de 1000º C, pode-se definir que aproximadamente 10% e 19% da destruição de exergia ocorrem no próprio dispositivo de aquecimento para a vazão de 0,05 L/s e 0,10 L/s respectivamente.

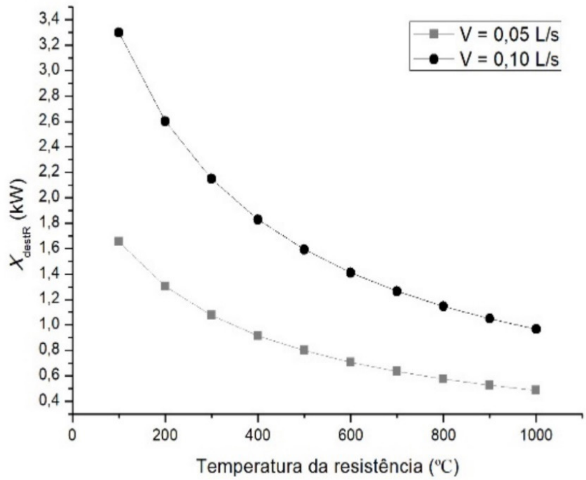


Figura 6 - Relação entre a exergia destruída na resistência elétrica e sua temperatura de funcionamento.

Fonte: Própria

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a ampla utilização do chuveiro no Brasil, é imprescindível o estudo e pesquisa aprofundada sobre a sua eficiência energética e exergética. A consideração da geração de vapor durante o funcionamento do chuveiro elétrico, mesmo que incomum em trabalhos científicos e até mesmo em normas, levanta a discussão sobre o impacto que ela implica no consumo de energia elétrica e se esse consumo representa um desperdício de uma energia considerada de qualidade.

É possível afirmar que o chuveiro elétrico possui baixa eficiência exergética, o que pode ser um fator importante a ser considerado no planejamento e incentivo de novas tecnologias que possam o substituir de maneira viável, com baixo custo e segurança. Utilizar a energia elétrica, considerada de alta qualidade, para aquecimento de água por meio do chuveiro elétrico, apesar de ser uma solução prática e perfeitamente cabível, pode não representar a melhor solução no futuro, dada a enorme destruição de exergia que seu funcionamento proporciona. De modo a minimizar seu impacto no aproveitamento da energia disponível no país, ações que visam aumentar ao máximo sua eficiência energética são de extrema importância, mesmo que em percentuais de apenas um algarismo.

Para maior aprofundamento no tema, sugere-se como trabalhos futuros a elaboração de bancada de ensaio embasada nas normas apresentadas anteriormente com a adição de sensor de vazão ao final do recipiente coletor para que seja possível averiguar a perda de massa no processo devido à formação de vapor. Outras avaliações poderiam ser realizadas

como a determinação do calor perdido pela carcaça do chuveiro e a taxa de evaporação da água devido às condições ambiente e altura entre o chuveiro e o recipiente coletor. Essa distância por onde água escoa em forma de gotas, tendo sua superfície de contato com o ar aumentada, poderia colaborar com a evaporação propriamente dita. Tais fenômenos não foram considerados no presente trabalho devido a suas complexidades e dificuldades de definição das condições ambientes teóricas, mas se apresenta como excelente objeto de estudo experimental.

REFERÊNCIAS

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, 2008, "Tabela de consumo de energia elétrica - chuveiros elétricos." Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/pbe5.pdf> Acesso em: 10 set. 2020

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.NBR- 15501: Aparelho eletrodoméstico fixo de aquecimento instantâneo de água - determinação da eficiência energética." Rio de Janeiro. 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. "NBR- 12087: Chuveiros elétricos - determinação da potência elétrica - método de ensaio." Rio de Janeiro. 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. "NBR- 12089: Chuveiros elétricos - determinação do consumo de energia elétrica - método de ensaio" Rio de Janeiro. 2015.

ÇENGEL,Yunus A.; BOLES, Michel A. Termodinâmica. AMGH Editora: Grupo A, 2013.

ELETROBRAS. "Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: Classe Residencial Relatório Sudeste." Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007.

Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. "Lei de Eficiência Energética". Disponível em:

<http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/lei.pdf> Acesso em: 03 set 2020

Rabello, Alice. "Quem inventou o chuveiro elétrico?". Disponível em: <https://www.mundoinverso.com.br/quem-inventou-o-chuveiro-eletrico/> Acesso em: 20 Jun 2020

Silveira, Fernando L. da. "Qual é o metal usado para resistência de chuveiros, ebulidor, secador de cabelo?". Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=qual-e-o-metal-usado-para-resistencia-de-chuveiros-ebulidor-secador-de-cabelo> Acesso em: 20 Jun 2020

SHAPIRO, Haward, N.; MORAN, Michael J.; MUNSON, Bruce R.; DEWITT, David P. Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos. Grupo GEN, 2005.

OLIVEIRA FILHO, Delly; TANABE, Celso Shiguetoshi; COSTA, José Márcio. Considerações da análise exergética em tarifas de energia elétrica. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande , v. 4, n. 1, p. 114-119, 2000 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662000000100021&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 04 Nov. 2020.

COSTA, José Márcio, D.S.,,Análise exergética em sistemas elétricos. Universidade Federal de Viçosa, 2001. Disponível em: < https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7716>. Acesso em: 22 Jun 2020.

BRZUSTOWSKI, T.A., GOLEM, P.J. Second-law analysis of energy processes - Part I: Exergy - An introduction. Transactions of the Society for Mechanical Engineers, v. 4, n. 4, 1977.

SOBRE O ORGANIZADOR

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutor em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.



A aplicação do conhecimento científico na engenharia mecânica

3

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2023



A aplicação do conhecimento científico na engenharia mecânica

3

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2023